

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Entwicklung eines numerischen Modells eines PCM-Speichers für die Anwendung in Wärmepumpensystemen

Masterarbeit

von

Martin Meister

Masterstudiengang: Umwelt und natürliche Ressourcen

Forschungsgruppe: Erneuerbare Energien

Abgabedatum: 14.02.2019

Korrektoren:

Maike Schubert

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften – IUNR 8820 Wädenswil

Prof. Jürg Rohrer

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften – IUNR 8820 Wädenswil

Impressum

Schlagworte: Wärmespeicher, Phasenwechselspeicher, PCM-Speicher,
Latentwärmespeicher

Zitiervorschlag: Meister, M. (2019). Entwicklung eines numerischen Modells eines PCM-Speichers für die Anwendung in Wärmepumpensystemen. In Masterarbeit ZHAW, unveröffentlicht.

Name des Instituts: Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen (IUNR)

Abstract

Energy storage systems allow to use renewable energy whenever needed. In heat pump systems thermal storage can be used on both, the primary and secondary, sides. In this paper, the optimization of a storage tank on the primary side is researched as a heat source for the heat pump. Such storages need a high heat capacity in temperature ranges from 0 to 20 °C in order to operate at a high coefficient of performance (COP). Suitable for this purpose are storages with phase change materials (PCM), so-called PCM-storage. In this temperature range, approx. 70 % more heat can be stored in a PCM-storage than in a sensitive storage of the same size. However, PCM-storages have a lower charging and discharging capacity than sensitive storages, therefore the higher heat capacity of the PCM-storage is not used if the design is inappropriate.

The PCM-storage must be designed depending on various influences, in order to use the additional heat capacity of it. For this reason, the storage behaviour of PCM-storages and the influences of the parameters must be understood. In this thesis, a simulation model of a PCM-storage with spherically encapsulated phase change material was developed. In the researched PCM-storage, the heat transfer between PCM and heat transport fluid (HTF) occurs through the flow around the PCM spheres.

The simulations basically confirmed the behaviour known from the literature. The heat exchange between PCM and HTF increases degressively with higher thermal conductivity of the PCM, progressively with smaller PCM radii and proportionally with increasing flow velocity in the storage tank. The increase in heat transfer improves the storage behaviour. If the heat capacity is too high, the storage tank cannot be fully charged, resulting in lower temperatures in the storage. Due to the lower temperatures in the storage, the power consumption is reduced. The filling density can be used to define how much heat can be extracted at high output. More heat can be extracted at high power and at low filling density than at high filling density. The selected temperature ranges also influenced the storage behaviour. At low melting temperatures of the PCM, the PCM-storage can be charged faster, but discharged slower.

The heating system should be simulated over a one-year period, in order to decide, which parameters are to be preferred with it.

Zusammenfassung

Zur Energiewende werden Energiespeicher benötigt, um die Energie nach Bedarf nutzen zu können. Beim Einsatz von Wärmepumpen kommen thermische Speicher, sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite, infrage. In dieser Arbeit wird die Optimierung eines Speichers auf der Primärseite als Wärmequelle für die Wärmepumpe untersucht. Solche Speicher müssen viel Wärme im Temperaturbereich von 0 bis 20 °C speichern können, damit die Wärmepumpe bei hohen Leistungszahlen betrieben werden kann. Dafür eignen sich Speicher mit Phasenwechselmaterialien (PCM; *engl. phase change material*), sogenannte PCM-Speicher. In diesem Temperaturbereich kann in einem PCM-Speicher ca. 70 % mehr Wärme als in einem gleich grossen sensiblen Speicher gespeichert werden. PCM-Speicher weisen jedoch eine geringere Lade- und Entladeleistung als sensible Speicher auf, wodurch die höhere Wärmekapazität von PCM-Speichern bei ungünstiger Auslegung nicht genutzt wird.

Um die zusätzliche Wärmekapazität von PCM-Speichern zu nutzen, muss der PCM-Speicher abhängig von verschiedenen Einflüssen ausgelegt werden. Dafür muss das Speicherverhalten von PCM-Speichern sowie die Einflüsse der Parameter verstanden werden. Für dieses Verständnis wurde in dieser Arbeit ein Simulationsmodell eines PCM-Speichers mit kugelförmig verkapseltem Phasenwechselmaterial entwickelt. Beim untersuchten PCM-Speicher erfolgt der Wärmeübergang zwischen PCM und Wärmetransportfluid (HTF; *engl. heat transport fluid*) durch die Umströmung der PCM-Kugeln.

Die Simulationen bestätigten grundsätzlich das aus der Literatur bekannte Verhalten. Der Wärmeübergang zwischen PCM und HTF steigt mit höherer Wärmeleitfähigkeit des PCMs degressiv, bei kleineren PCM-Radien progressiv und bei steigender Durchflussgeschwindigkeit im Speicher proportional. Ein grösserer Wärmeübergang verbessert das Lade- und Entladerverhalten in jedem Fall. Bei einer zu hohen Wärmekapazität kann der Speicher nicht vollständig geladen werden, wodurch im Speicher tiefere Temperaturen vorliegen und die Leistungsentnahme gesenkt wird. Über die Füllichte kann definiert werden, wie viel Wärme bei hoher Leistung entnommen werden kann. Bei tiefer Füllichte kann mehr Wärme bei hoher Leistung entnommen werden als bei hoher Füllichte. Auch die gewählten Temperaturbereiche beeinflussten das Speicherverhalten. Bei tiefen Schmelztemperaturen des PCMs, kann der PCM-Speicher schneller geladen, aber dafür langsamer entladen werden.

Zur Entscheidung in welchen Wärmesystemen welche PCM-Parameter zu bevorzugen sind, sollte das Wärmesystem über ein Jahr simuliert werden.

Inhalt

1	Einleitung	10
2	Theorie.....	11
2.1	Phasenwechselmaterialien.....	11
2.2	PCM-Speicherausführungen	14
2.3	Wärmepumpensystem	20
2.4	Stand der Technik	20
3	Methodik	22
3.1	Getroffene Annahmen und deren Vereinfachungen	22
3.2	Beschreibung des Modells	26
3.3	Plausibilisierung	34
3.4	Standardsimulation	48
3.5	Untersuchung des Speicherverhaltens.....	51
4	Resultate.....	58
4.1	Untersuchung der Parameter im PCM-Speicher.....	58
4.2	Wärmepumpensystem	80
4.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse	82
5	Diskussion.....	85
5.1	Validierung des Modells	85
5.2	Modell mit Solver.....	85
5.3	Betrachtete PCM-Speicherausführung	85
5.4	Wärmepumpensystem	86
5.5	Vergleich des PCM-Speichers und des sensibler Speichers	86
5.6	Weiteres Vorgehen	87
6	Literaturverzeichnis	88
7	Tabellenverzeichnis.....	91

8	Abbildungsverzeichnis.....	92
	Anhang 1.....	99
	Anhang 2.....	100

Abkürzungsverzeichnis

COP	Leistungszahl	<i>engl. coefficient of performance</i>
HTF	Wärmetransportfluid	<i>engl. heat transport fluid</i>
IEA	Internationale Energie Agentur	
JAZ	Jahresarbeitszahl	
PCM	Phasenwechselmaterial	<i>engl. phase change material</i>
PVT	Photovoltaik/ Thermisch	
SHC	Solares Wärme- und Kälteprogramm	engl. solar heating and cooling program
WP	Wärmepumpe	

Nomenklatur

Jahresarbeitszahl: Die durchschnittliche Leistungszahl einer Wärmepumpe in einem Jahr.

Kalter Speicher: Bezeichnet in dieser Arbeit einen Speicher der Temperaturen zwischen 0 und 20 °C speichert.

Konvektion: Wärmetransport aufgrund einer Strömung.

Schmelzwärme: Die für den Phasenübergang benötigte Wärme.

Sensibler Speicher: Wärmespeicher, in welchem die Wärme durch die Temperaturänderung fühlbar gespeichert wird.

Solver: Eine programmierte Funktion, die mathematische Probleme numerisch löst.

Leistungszahl: Verhältnis zwischen der erzeugten Wärmeleistung zur eingesetzten, elektrischen Leistung einer Wärmepumpe.

Massenstrom: Bezeichnet den Durchfluss in Masse pro Zeit.

PCM-Speicher: Wärmespeicher mit Phasenwechselmaterial. Ein Teil der Wärme wird im Phasenübergang vom Phasenwechselmaterial gespeichert. Wird auch **Latentwärmespeicher** genannt.

PVT-Kollektoren: Werden auch **Hybridkollektoren** genannt. Dies sind Photovoltaikkollektoren, welche Strom und Wärme produzieren.

Quelltemperatur: Die Temperatur einer Wärmequelle.

Wärmequellen: Wärmepumpen beziehen die Wärme von Wärmequellen.

Wärmetransportfluid: Flüssigkeit, mit welcher Wärme transportiert wird.

Zyklenstabilität: Beim PCM bezieht sich die Zyklenstabilität darauf, wie oft ein Phasenwechsel durchgeführt werden kann, ohne dass sich die Stoffeigenschaften ändern.

Zeichenübersicht

A : Fläche [m^2]

c_p : spezifische Wärmekapazität [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

C_p : Wärmekapazität [$\frac{J}{K}$]

E : Energie [J]

g : Gravitationsbeschleunigung 9.81 [$\frac{m}{s^2}$]

m : Masse [kg]

\dot{m} : Massenstrom [$\frac{kg}{s}$]

n : Anzahl [–]

Q : Wärme [J]

R : Radius [m]

T : Temperatur [K]

t : Zeitdauer [s]

V : Volumen [m^3]

Δx : Schichthöhe [m]

α : Wärmeübergangszahl [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

β : Isobare thermische Volumenausdehnungskoeffizient [$\frac{1}{^\circ C}$] bei Wasser = $2.07 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ C}$
(Rumble, 2018)

λ : Wärmeleitfähigkeit [$\frac{W}{m \cdot K}$]

σ_{PCM} : Schmelzwärme [$\frac{J}{kg}$]

η : Anteil [–]

κ : Karman Konstante 0.4 [–]

1 Einleitung

In der Schweiz fallen ca. 38.5 % des inländischen Energieverbrauchs für Warmwasser und Raumwärme an (BFE, 2017). Bei den privaten Haushalten beträgt dieser Anteil gar 81.7 % des Energieverbrauchs (BFE, 2017). Diese Wärmemengen werden in der Schweiz hauptsächlich durch fossile Brennstoffe erzeugt (ENDK, 2014). Erneuerbare Energien können einen grossen Beitrag zur Reduzierung des inländischen Treibhausgasausstosses leisten. Oftmals stehen erneuerbare Energien gerade dann nicht zur Verfügung, wenn sie benötigt werden. Daher sind Energiespeicher von derart grosser Bedeutung.

Besonders lukrativ ist die Energiespeicherung in einer Wärmequelle für Wärmepumpen. Die Energie kann dann genutzt werden, wenn sie benötigt wird und die Wärmepumpe kann aufgrund der hohen Quelltemperatur effizient betrieben werden. Der Stromverbrauch wird somit durch die Nutzung der gespeicherten Energie und durch den geringeren Energieverbrauch der Wärmepumpe gesenkt. Damit die Wärmepumpe effizient betrieben werden kann, sollte der Temperaturbereich in diesem Speicher zwischen 0 und 20 °C liegen (siehe Anhang 1). In dieser Arbeit werden Speicher, welche Wärme unter 20 °C speichern, „kalte Speicher“ genannt. Wenn im „kalten Speicher“ Wärme gespeichert wird, die mit einer Temperaturänderung des Fluids einhergeht, fällt der Speicher gross aus, damit ausreichend Wärme gespeichert werden kann. Es sind somit diejenigen Speicher von Vorteil, die bei geringer Temperaturänderung viel Wärme speichern können. PCM-Speicher sind Wärmespeicher, die HTF und PCM beinhalten. Im HTF wird die Wärme nur sensibel und im PCM hauptsächlich latent (durch den Phasenwechsel) gespeichert. Das Laden und Entladen im PCM-Speicher erfolgt neben dem Austausch vom HTF über den Wärmeübergang zwischen PCM und HTF. Die Leistung der PCM-Speicher wird durch diesen Wärmeübergang reduziert, weil die im PCM gespeicherte Wärme zuerst an das HTF übertragen werden muss. Es kann nur die bereits im HTF gespeicherte Wärme schnell genutzt werden.

In dieser Arbeit sollen die folgenden Fragen aufgrund eines vereinfachten Modells eines PCM-Speichers beantwortet werden:

- a.) Wie wirken sich die einzelnen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Massenstrom, PCM-Radius, Dichte, Füllichte, Schmelzwärme, Schmelzbereich, Lade- und Entladetemperaturen) auf die Speichertemperaturen, die nutzbare Wärmemenge und die Leistung aus?
- b.) Was sind die wesentlichen Unterschiede im Verhalten eines sensiblen Speichers zu einem PCM-Speicher?
- c.) Wie unterscheiden sich PCM-Speicher und sensible Speicher in einem Wärmepumpensystem?

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verhalten eines PCM-Speichers aufgrund eines Simulationsmodells zu verstehen, um PCM-Speicher für verschiedene Wärmesysteme auszulegen.

2 Theorie

Es werden die Grundlagen von Phasenwechselmaterialien, PCM-Speicherausführungen und der aktuelle Stand der Forschung beschrieben.

2.1 Phasenwechselmaterialien

Während dem Phasenwechsel wird einem Material Wärme zu- oder abgeführt, wobei sich die Temperatur des Materials nicht bis sehr gering verändert. Die beim Phasenwechsel aufgenommene oder freigesetzte Energie wird latente Wärme genannt. Im PCM-Speicher wird für die Wärmespeicherung hauptsächlich der Phasenübergang fest/flüssig verwendet, weil dabei die Volumenänderung gering und die Schmelzwärme hoch ist.

Das Potential von der Wärmespeicherung im Phasenübergang lässt sich beim Vergleich der gespeicherten Wärme von A16 und Wasser mit den Angaben aus Tabelle 1 veranschaulichen. Mit diesen Werten wird in Abbildung 1 dargestellt, wie viel Wärme durch die Temperaturänderung von 0 °C bis zur untersuchten Temperatur im A16 und Wasser gespeichert werden kann.

Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften von A16 (aus Datenblatt in Anhang 2), einem organischen PCM mit einem Schmelzbereich von 16 bis 18 °C, und Wasser (Rumble, 2018).

Typ	Schmelztemperatur [°C]	Dichte [kg/m ³]	Schmelzwärme [kJ/kg]	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
A16	16-18	760	213	2.37	0.104
Wasser	0	1'000	333.5	4.185	0.5562

Beim Vergleich zwischen A16 und Wasser wird ersichtlich, dass die spezifische Wärmekapazität (Steigung in Abbildung 1) von A16 kleiner ist als diejenige vom Wasser. Bei Temperaturen unterhalb des Phasenübergangs kann mehr Wärme im Wasser gespeichert werden. Über dem Schmelzbereich speichert das A16 bei 18 °C dieselbe Wärmemenge, die Wasser bei ca. 61 °C speichert. Der Vorteil einer hohen Wärmekapazität von PCM kann nur dann genutzt werden, wenn die gewünschte Speichertemperatur im Bereich des Schmelzbereiches liegt. Bei Eisspeichern wird auch die im Phasenübergang gespeicherte Wärme genutzt. Der Schmelzpunkt liegt jedoch mit 0 °C tief und kann nicht verändert werden. In einem PCM-Speicher kann das PCM mit dem gewünschten Schmelzbereich eingebracht werden.

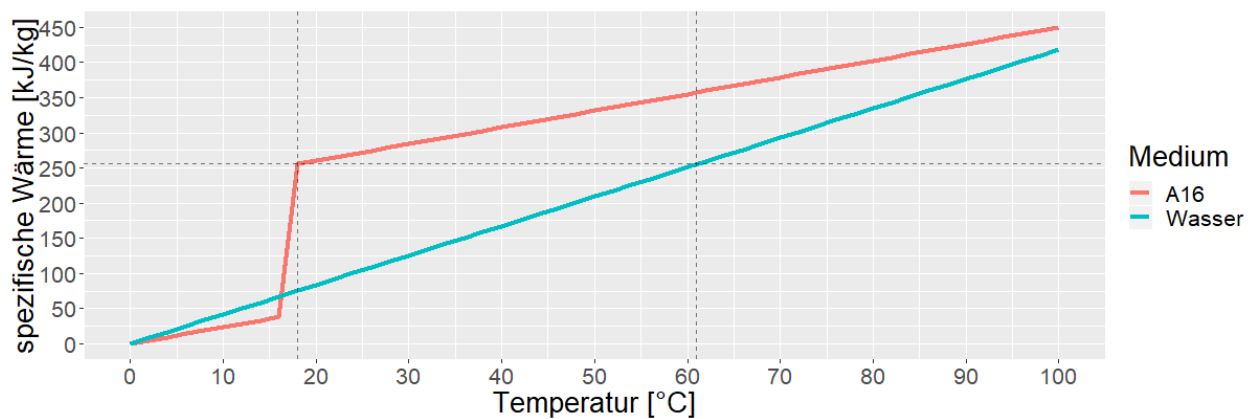


Abbildung 1: Speicherbare, spezifische Wärme [kJ/kg] bezogen auf 0 °C in Funktion der Temperatur [°C] des Mediums.

2.1.1 Kritische Punkte im Verhalten von PCM

Phasenwechselmaterialien weisen einen Schmelzbereich auf und es können Unterkühlung und Hysterese auftreten. Diese kritischen Punkte im Verhalten von PCM werden hier kurz erläutert.

Schmelzbereich

Materialien, die aus verschiedenen Elementen bestehen weisen einen Schmelzbereich auf, im Gegensatz zu reinen Stoffen, welche einen Schmelzpunkt aufweisen. Im Schmelzbereich liegen die verschiedenen Elemente des Materials fest oder flüssig vor. Der Schmelzbereich befindet sich zwischen der Solidus-Temperatur $T_{Solidus}$ und der Liquidus-Temperatur $T_{Liquidus}$. Unter $T_{Solidus}$ ist das Material komplett fest und über $T_{Liquidus}$ ist es komplett flüssig. (Dincer & Rosen, 2010)

Unterkühlung

Bei der Unterkühlung wird das Material unter den Gefrierpunkt gekühlt, ohne dabei fest zu werden. Wenn anschliessend die Kristallisation einsetzt, erwärmt sich das Material beim Erstarren bis zum Gefrierpunkt. Die Unterkühlung entspricht dem Temperaturunterschied von der tiefsten Temperatur, bei welcher das Material noch flüssig ist, bis zum Gefrierpunkt wie in Abbildung 2 ersichtlich. (Rubitherm, 2018)

Hysterese

Die Hysterese bezeichnet die Temperaturdifferenz zwischen Schmelz- und Gefrierpunkt (siehe Abbildung 2) (Rubitherm, 2018).

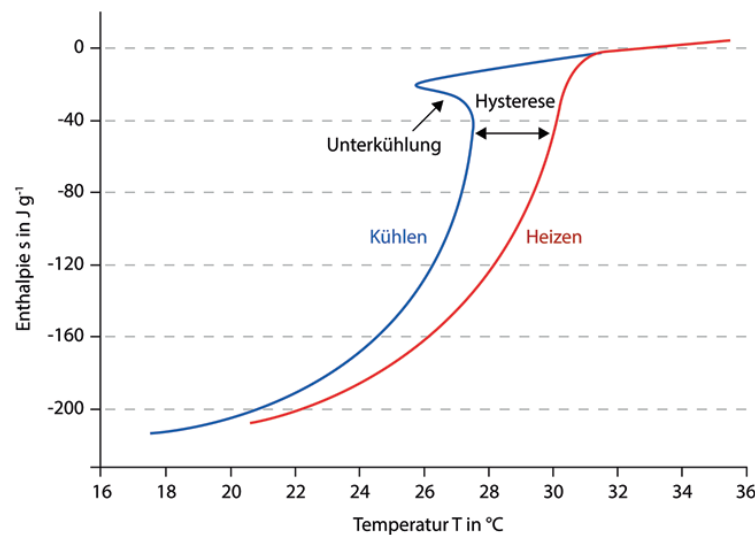


Abbildung 2: Darstellung von Hysterese und Unterkühlung (Stadler & Hauer, 2017).

2.1.2 Anforderungen an PCM

Das PCM wirkt bei der Betrachtung der zu speichernden Wärme sehr lukrativ. Damit es auch rentabel eingesetzt werden kann, soll nach Stadler & Hauer (2017) auf folgende Kriterien geachtet werden:

- Physikalische Kriterien:
 - Hohe Schmelzwärme und spezifische Wärmekapazität
 - Geeigneter Schmelzbereich
 - Gute Wärmeleitfähigkeit
 - Reproduzierbarer Phasenübergang
 - Beherrschbare Unterkühlung
- Technische Kriterien:
 - Physikalische und chemische Stabilität
 - Geringer Dampfdruck
 - Beherrschbare Volumenänderung
 - Geringe Korrosivität gegenüber Konstruktionswerkstoffen
 - Geeignetes Schmelz- und Erstarrungsverhalten; Zyklenstabilität
- Ökonomische Kriterien:
 - Niedriger Preis
 - Verfügbarkeit
 - Umweltverträglichkeit, geringe Toxizität

2.1.3 PCM-Parameterbereiche

Zur Auswertung werden die PCM-Parameterbereiche anhand der Datenblätter von Anhang 2 festgelegt. Daraus ergeben sich für PCMs mit einem Schmelzbereich zwischen 0 und 20°C folgende Parameterbereiche:

- spezifische Wärmekapazität: $1.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{ bis } 3.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- Schmelzwärme: $100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ bis } 250 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Dichte: $800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ bis } 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Wärmeleitfähigkeit: $0.1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \text{ bis } 0.6 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Die Werte dieser Parameterbereiche werden im Kapitel 4.1 verwendet.

2.2 PCM-Speicherausführungen

Durch die Form des PCM-Speichers kann der Wärmeaustausch zwischen PCM und HTF definiert werden. In Abbildung 3 sind drei verschiedene Grundprinzipien für den Wärmeaustausch zwischen Speicher und Wärmeentnahme dargestellt. In Abbildung 3 links wird die Wärme über die Oberfläche des Speichers abgegeben. In Abbildung 3 Mitte erfolgt der Wärmeaustausch zwischen PCM und HTF über innere Oberflächen. In Abbildung 3 rechts befindet sich das PCM mikroverkapselt im HTF.

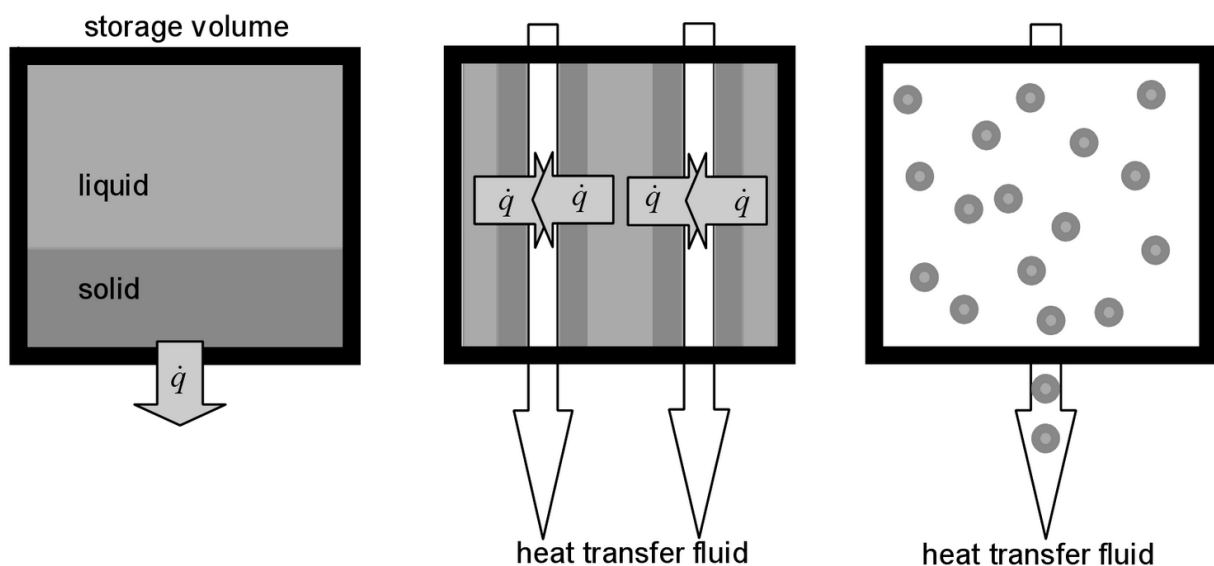


Abbildung 3: Wärmeaustauschmöglichkeiten: Über die Oberfläche des PCM (links), über interne Oberflächen (Mitte), über PCM im Wärmetransportfluid (rechts) (Mehling & Cabeza, 2008).

Diese drei Konzepte werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

2.2.1 Wärmeübertragung über die Speicheroberfläche

In dieser Ausführung werden PCM eingesetzt um das Temperaturniveau konstant zu halten. Sie können zum Beispiel als Kühlelement in einer Kühlbox oder als im Beton eingebundenes PCM bei Gebäuden eingesetzt werden. Abbildung 4 dient als Veranschaulichung des Prinzips. Bei einer Kühlbox stellt diese die isolierte Umgebung «insulated environment» dar. Das Kühlelement «storage» besteht in diesem Fall aus PCM, welches aufgrund der hohen Wärmekapazität die

tiefen Temperaturen lange hält. Die zu kühlenden Produkte «demand» werden durch den Temperatúraustausch mit dem kalten Kühlelement passiv gekühlt.

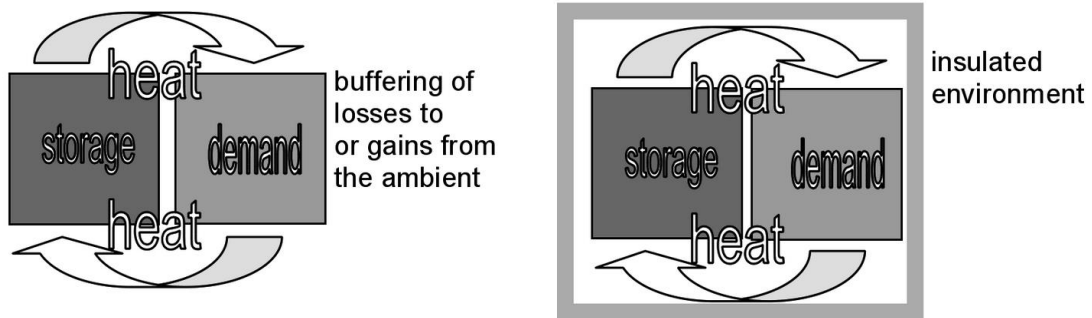


Abbildung 4: Wärmeübertragung über die Oberfläche (Mehling & Cabeza, 2008). Das PCM liegt jeweils im Speicher (storage) vor. Die Wärme wird passiv aufgrund des Temperaturunterschieds mit der Nachfrageseite (demand) ausgetauscht.

2.2.2 Wärmeübertragung an internen Oberflächen

In diesem Konzept ist der Wärmeaustausch aufgrund der Durchflussgeschwindigkeit des HTFs im PCM-Speicher regelbar. Das Konzept wird in drei verschiedene Ausführungen unterteilt.

Wärmetauscher

Das Wärmetauscherkonzept ist das verbreitetste Konzept. Hier wird ein Speicher mit PCM gefüllt. Dieser Speicher enthält durchgehende Leitungen, welche mit einem HTF durchströmt werden. Dadurch wird das PCM erhitzt oder gekühlt (Mehling & Cabeza, 2008). Mögliche Wärmetauscher Ausführungen sind in Abbildung 5 ersichtlich. Hierbei handelt es sich um ein geschlossenes System, welches Schutz vor Verschmutzung, Korrosion und Verlust an Speichermaterial gewährleistet (Stadler & Hauer, 2017).

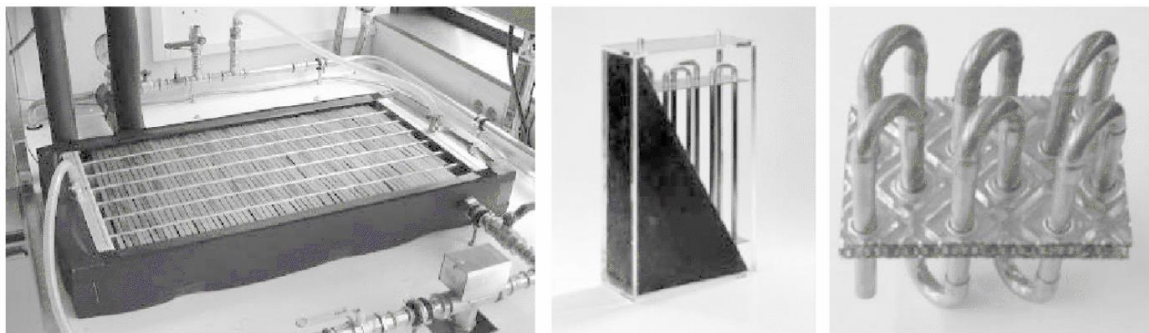


Abbildung 5: Verschiedene Wärmetauscherkonzepte (Mehling & Cabeza, 2008).

In Abbildung 6 ist das Wärmetauscherkonzept sowie der Leistungsverlauf über die Zeit vereinfacht dargestellt.

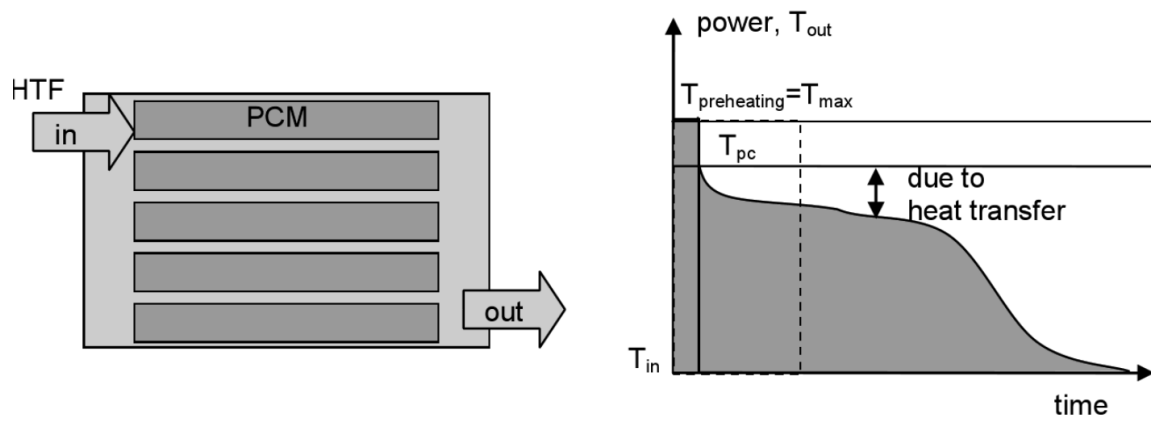


Abbildung 6: Wärmetauscherkonzept (links), Leistungsverlauf (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt den Leistungsverlauf eines sensiblen Speichers (Mehling & Cabeza, 2008).

Wärmetauscherkonzepte weisen folgende Eigenschaften auf (Mehling & Cabeza 2008):

- Hohe Füllichten; bis zu 95 % des Volumens wird mit PCM gefüllt, daher ist sehr wenig HTF im Speicher vorhanden.
- Für eine kurze Zeit kann eine hohe Leistung bei T_{max} entnommen werden, weil das in den Leitungen vorhandene HTF die Speichertemperatur aufgenommen hat.
- Anschliessend kann eine hohe bis mittlere Leistung, abhängig von der Wärmeübertragung, entnommen werden.

Um die Wärmeübertragung zu erhöhen können Graphit oder metallische Wärmeleitstrukturen, wie in Abbildung 7 dargestellt, zwischen dem PCM und dem Fluid angebracht werden. Diese Strukturen im Wärmetauscher erhöhen den Wärmeaustausch des PCM in der festen Phase. Jedoch führen solche Strukturen zu zusätzlichen Kosten und können sich negativ auf die Wärmeübertragung von PCM im flüssigen Zustand auswirken, weil die Konvektion unterdrückt wird. (Mehling & Cabeza, 2008)

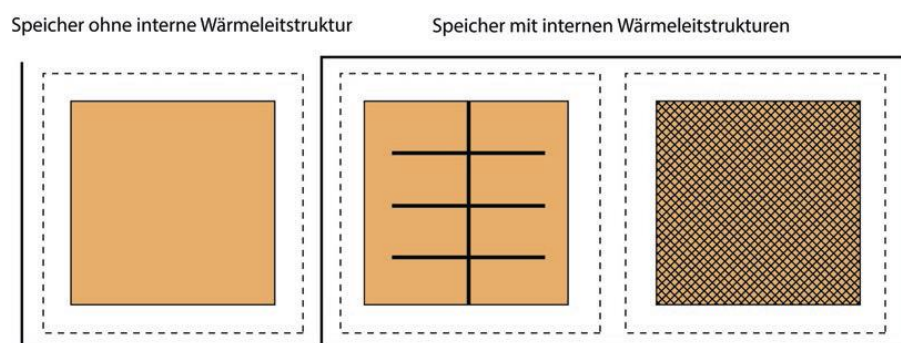


Abbildung 7: Mögliche interne Wärmeleitstrukturen (Stadler & Hauer, 2017).

Direktkontakt

Um den thermischen Widerstand zwischen PCM und HTF zu verringern, kann das HTF das PCM direkt durchströmen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich das PCM nicht mit dem HTF vermischt. Wenn ein Salzhydrat als PCM verwendet wird, kann Öl als HTF eingesetzt werden und wenn Paraffin als PCM verwendet wird, kann Wasser als HTF verwendet werden (Mehling & Cabeza, 2008). Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass das PCM nicht vollständig erstarrt, wodurch die Kapazität des Speichers vermindert wird (Stadler & Hauer, 2017). Wenn das HTF eine geringere Dichte als das PCM aufweist, kann es von unten in den PCM Speicher eingebracht werden, wobei die Wärmeübertragung während dem Aufstieg stattfindet (Mehling & Cabeza, 2008). Dieser Fall wird in Abbildung 8 dargestellt. Um sicherzustellen, dass das PCM nicht in den Warm- oder den Heizwasserkreislauf gelangt, verläuft das HTF in einem geschlossenen Kreislauf und übergibt die Wärme über einen Wärmetauscher an den Warm- oder den Heizwasserkreislauf.

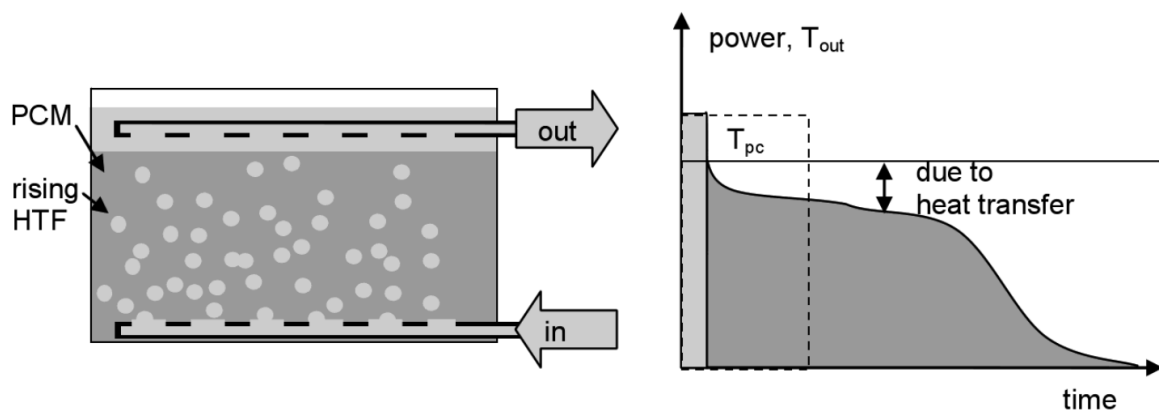


Abbildung 8: Direktkontaktkonzept mit Leistungsverlauf (Mehling & Cabeza, 2008).

Direktkontaktkonzepte zeichnen sich durch folgende Punkte aus (Stadler & Hauer 2017, Mehling & Cabeza 2008):

- Hohe Füllichten; bis zu 90 % sind PCM. Es werden keine Wärmeleitstrukturen benötigt. Dafür muss genügend HTF eingefüllt werden, damit die Austrittsleitung komplett von HTF umgeben ist, um den Austritt von PCM zu verhindern.
- Verbesserte Wärmeübertragung durch direkten Kontakt.
- Es wird zur Sicherheit eine extra Pumpe und Wärmetauscher zum Separieren des HTFs verwendet.
- Geringere Wärmekapazität, da eine Erstarrung des PCMs verhindert werden muss.
- Komplexere Regelung: Die Regelung wird so abgestimmt, dass das komplette Erstarren des PCMs vermieden wird.

Modulausführung

Das PCM befindet sich in Behältern (makroverkapselt), welche vom HTF umströmt werden. Diese Ausführung wird auch als Festbettspeicher (engl: *packed bed storage*) bezeichnet. Es wird

zusätzliches Material für die Kapseln benötigt. Die Menge und Anordnung der Kapseln können einfach verändert werden. Die Vereinfachung des Konzepts ist in Abbildung 9 ersichtlich.

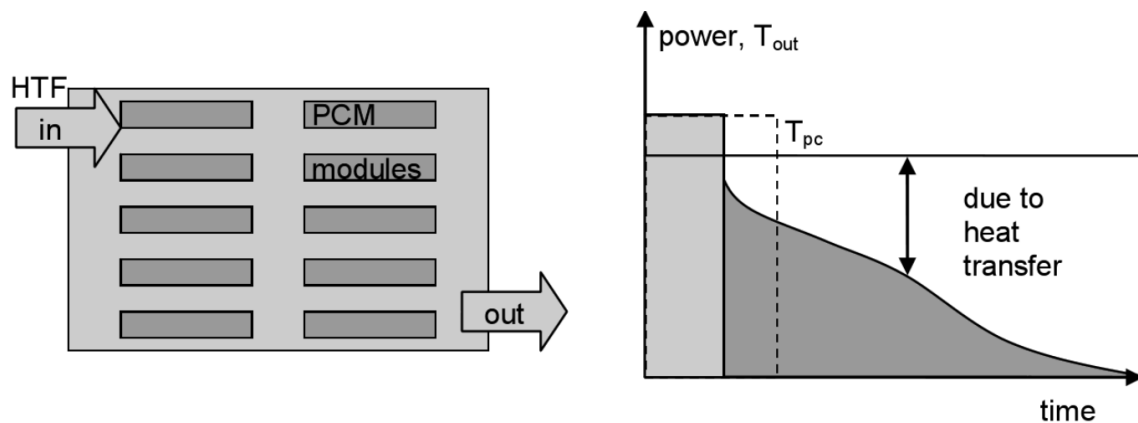


Abbildung 9: Modulausführung mit Leistungsverlauf (Mehling & Cabeza, 2008).

Die Modulausführung zeichnet sich durch folgende Punkte aus (Mehling & Cabeza 2008):

- Mittlere Speicherdichte, durch die Kombination von sensiblen und latenten Speichern.
- Hohe Leistung zu Beginn, weil eine grosse Menge HTF vorgewärmt ist.
- Geringere Leistung später aufgrund des Wärmeaustausches zwischen dem PCM und dem HTF.

Das PCM kann, wie in Abbildung 10 ersichtlich, in verschiedenen Formen und Grössen verkapselt werden.

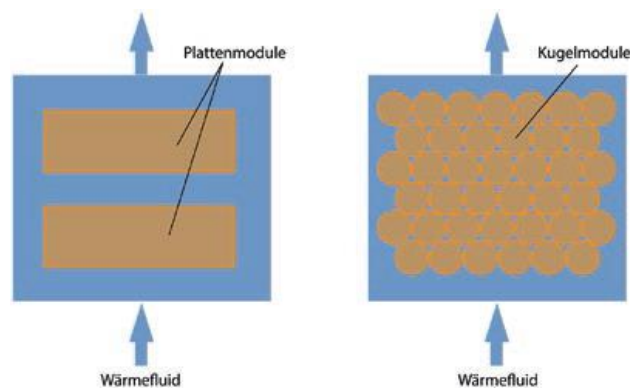


Abbildung 10: Beispiele für verschiedene Verkapselungsformen (Stadler & Hauer, 2017).

2.2.3 Wärmeübertragung durch den Austausch des Wärmespeichermediums

In diesem Suspensionskonzept befindet sich das PCM mikroverkapselt im HTF. Die Suspension ist pumpfähig, auch wenn das PCM bereits erstarrt ist. Mit der Erhöhung der Füllichte steigen die Wärmekapazität und die Viskosität. Bei zu hoher Viskosität kann die Verkapselung des PCMs beschädigt werden, wodurch das PCM austritt. Das Schema dazu ist in Abbildung 11 ersichtlich. Beim Leistungsverlauf sieht man, dass die Leistung wie in einem sensiblen Speicher direkt verwendet werden kann und dass sie aufgrund der höheren Kapazität angestiegen ist.

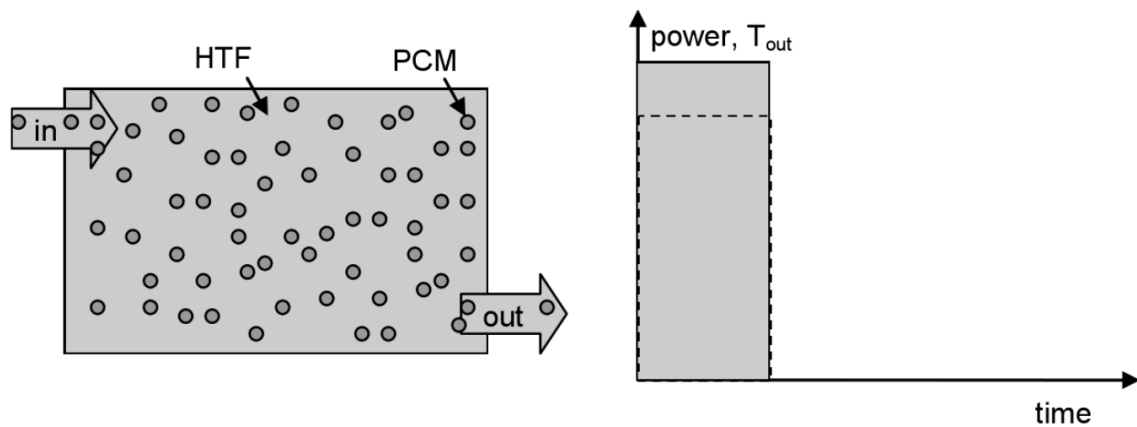


Abbildung 11: Suspension (Slurry) mit Leistungsverlauf (Mehling & Cabeza, 2008).

Die Suspension zeichnet sich durch folgende Punkte aus (Mehling & Cabeza, 2008):

- Erhöhte Speicherkapazität im Vergleich zu einer reinen Flüssigkeit.
- Hohe Leistung, weil mehr Wärme pro Volumen transportiert wird.
- Hoher Wärmeübergang vom PCM zum HTF, weil das PCM mikroverkapselt ist.

Das PCM befindet sich nicht nur im Speicher, sondern im ganzen System. Daher kann viel PCM dem System hinzugefügt werden.

2.2.4 Verwendetes Konzept für das Modell

In dieser Arbeit wird die Modulausführung mit kugelförmig verkapseltem PCM im Speicher modelliert. Die Modulausführung eignet sich, weil ein sensibler Speicher einfach umgerüstet werden kann und viele Parameter verändert werden können. Die Bezeichnung PCM-Speicher sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich in den kommenden Kapiteln nur auf die Modulausführung.

Die weiteren beschriebenen PCM-Speicherausführungen werden aus den folgenden Gründen nicht untersucht:

- Beim Prinzip der Wärmeübertragung über die Oberfläche kann die Wärmeentnahme nicht gesteuert werden.
- Das Wärmetauscherkonzept ist in der Realität schwer anzupassen, dies erschwert eine Nachbildung des Modells zur Überprüfung.
- Das Direktkontaktkonzept benötigt eine aufwändige Steuerung zur Vermeidung, dass das PCM komplett fest wird und es muss sichergestellt werden, dass das PCM nicht aus dem Speicher gelangt.
- Die Suspension eignet sich nicht aufgrund der hohen Viskosität und der damit verbundenen Gefahr, dass die Mikroverkapselung beschädigt wird.

2.3 Wärmepumpensystem

Das in dieser Arbeit erstellte Modell eines PCM-Speichers wird zur Untersuchung des Speichers vereinfacht in einem Wärmepumpensystem simuliert. Das L-Sol System ist ein Wärmepumpensystem, bei welchem die Wärmequelle der Wärmepumpe über erneuerbare Energie geladen wird. Dieses dient zur Veranschaulichung eines Wärmepumpensystems in welchem ein PCM-Speicher eingesetzt werden könnte. Zur besseren Verständlichkeit werden die Simulationen vereinfacht ans L-Sol angepasst. Dabei wird die Wärmezufuhr in den Speicher als PVT-Kreislauf und die Wärmeentnahme vom Speicher als WP-Kreislauf benannt.

Das L-Sol System besteht aus Hybridkollektoren, einem kalten Speicher, einem Warmwasserspeicher, einem Heizungswasserspeicher sowie einer Wärmepumpe (siehe Abbildung 12).

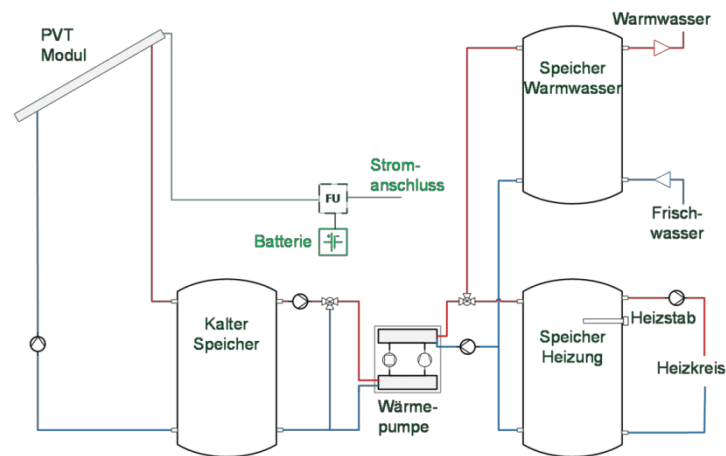


Abbildung 12: Prinzipschema des L-Sol Systems (Rohrer, 2018).

Das L-Sol System soll eine höhere Energieeffizienz als Luft-Wasser-Wärmepumpen und tiefere Anschaffungskosten als Erdwärmesonden und Eisspeicher aufweisen (Rohrer, 2018). Der Grund dafür ist, dass L-Sol Systeme Wärme und Strom in Hybridkollektoren erzeugen. Die erzeugte Wärme wird durch ein Fluid aufgenommen, welches durch die Kollektoren fließt. Dadurch werden die Hybridkollektoren gekühlt, wodurch sich deren Wirkungsgrad erhöht. Pro 1 °C Temperaturanstieg sinkt die Leistung von PV-Modulen um ca. 0.4 % (Mertens, 2015). Das durch die Hybridkollektoren fließende Fluid nimmt die Wärme aus der Einstrahlung und der Umgebung auf, um den kalten Speicher zu erwärmen. Der kalte Speicher dient als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Durch die vergleichsweise hohen Quelltemperaturen gegenüber anderen Wärmequellen kann die Wärmepumpe mit einer höheren Leistungszahl betrieben werden.

2.4 Stand der Technik

Im Bereich der Phasenwechselmaterialien zur Speicherung von latenter Wärme wurde in den letzten Jahren viel geforscht. Zwischen 2003 bis 2007 wurde von der internationalen Energie Agentur (IEA) im Solar Heating and Cooling Programm (SHC), unter der Task 32 „Advanced

storage concepts for solar houses and low energy buildings“, der Einsatz von PCM in Wärmespeicher untersucht. Dabei wurden marktreife Phasenwechselmaterialien entwickelt, welche heute bereits eingesetzt werden (Kerskes u. a., 2006). In diesen Untersuchungen der IEA wurden verschiedene Einsätze von PCM in Wärmespeicher mit TRANSYS simuliert. Dabei lagen die Speichertemperaturen zwischen ca. 20 °C und 80 °C. Die geringe Wärmeübertragung vom PCM zum HTF wurde als Schwachstelle betrachtet (Wolfgang, 2005).

In Peng u. a. (2014) wurde das Verhalten von makroverkapselten PCM-Kugelmodulen bei hohen Temperaturen (250-400 °C) untersucht, wobei geschmolzenes Salz als HTF verwendet wurde. Die Auswirkungen vom Radius der PCM-Kugelmodulen, dem Volumenstrom dem HTF und der Speicherhöhe wurden dabei untersucht. Dabei ergab sich, dass die Senkung des PCM-Radius, die Senkung des Volumenstromes und die Erhöhung der Speicherhöhe die Lade- und Entladeeffizienz verbesserte. Die Effizienz bezieht sich dabei auf das Verhältnis der zugeführten zur nutzbaren Wärme. Bei einem tiefen Volumenstrom bleibt das durchströmende HTF länger im Speicher, wodurch insgesamt mehr Wärme an den Speicher übertragen wird.

PCM-Speicher wurden bereits in möglichen Wärmesystemen untersucht. Zum Beispiel wurde in Kunkel u. a. (2017) ein PCM-Speicher als Wärmequelle für eine Wärmepumpe eingesetzt, dabei konnte der COP der Wärmepumpe um 88 % gegenüber einer Luft/Wasser Wärmepumpe erhöht werden.

In Dutil u. a., (2011) wurden viele der bereits vorhandenen Simulationsmodelle kategorisiert und zusammengefasst. Es wurden in vielen Forschungsarbeiten verschiedene Modelle von PCM-Speichern erstellt. Bei den meisten liegt der Fokus auf der Nachstellung einer PCM-Speicherausführung unter Berücksichtigung bestimmter Parameter. Dabei wurde die Genauigkeit des Modells mit den Messwerten überprüft, wobei die Einflüsse der einzelnen Parameter nicht untersucht wurden. Es gibt auch generalisierte Modelle, in welchen die Parameter analysiert wurden, wie zum Beispiel in Yanbing u. a., (1999). Diese Modelle bilden hauptsächlich eine Art „PCM-Wärmetauscher“ nach, in welchem das PCM durch eine Umströmung des HTFs geladen und entladen wird. Dabei werden für den Wärmeübergang wichtige Parameter untersucht und die Verbesserung von diesen beschrieben.

In dieser Arbeit wird ein generalisiertes Modell eines PCM-Speichers vom Modultyp mit kugelförmig verkapseltem PCM erstellt. Dabei wird ein kompletter PCM-Speicher und nicht nur der Wärmeübergang nachgebildet. Dadurch können weitere Parameter, wie zum Beispiel die Wärmekapazität, die Füllichte untersucht werden. Weil kein öffentliches Modell eines PCM-Speichers gefunden wurde, wurde dieses Modell komplett neu erstellt.

3 Methodik

Im folgenden Kapitel werden die Annahmen und deren Vereinfachungen, die Herleitung der verwendeten Formeln und die analytische Überprüfung des in Python erstellten Simulationsmodells beschrieben. Das Modell dieser Arbeit dient dazu, das Verhalten eines PCM-Speichers qualitativ nachzustellen, damit ermittelt werden kann, wie sich einzelne Parameter auf einen PCM-Speicher auswirken. Es wurde keine Validierung des Modells durchgeführt, daher kann nicht gesagt werden, wie akkurat die simulierten Werte sind. Deshalb können die Einflüsse der Parameter nur miteinander verglichen und keine quantitativen Aussagen durchgeführt werden.

3.1 Getroffene Annahmen und deren Vereinfachungen

Es wurde ein parametrisiertes Modell mit vereinfachtem Speicherverhalten nachgebildet. Die gemachten Einschränkungen beeinflussen das Speicherverhalten nur minimal und senken den Rechenaufwand stark, zudem lässt sich das thermische Verhalten immer noch plausibel darstellen. Folgende Vereinfachungen wurden getroffen:

- Die Wärmeflüsse werden nur eindimensional, in vertikaler Richtung und schichtweise betrachtet.
- Innerhalb einer Schicht wird mit einer Temperatur für das HTF und einer Temperatur für das PCM gerechnet.
- Es wird kein Verkapselungsmaterial beim PCM berücksichtigt.
- Es wird keine durch Reibung entstehende Wärme berücksichtigt.
- Das Speichervolumen gilt als inkompressibel. Es wird keine Volumenänderung berücksichtigt.
- Es wird eine Änderung der spezifischen Wärmekapazität durch den Phasenwechsel berücksichtigt. Ansonsten werden alle Stoffeigenschaften als konstant angenommen.
- Die freie Konvektion wird im HTF nicht als Strömung, sondern als Wärmeleitung zwischen den Schichten betrachtet. Dadurch beeinflusst die freie Konvektion den Wärmeübergang zwischen PCM und HTF nicht.
- Eine Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers, erfolgt nur bei der Berechnung der oben genannten Wärmeleitfähigkeit für die freie Konvektion.
- Die Strömung fließt vom Zufluss zum Abfluss, dabei wird mit einer über den ganzen Querschnitt konstanten Strömung gerechnet.

3.1.1 Limitierung des Modells

Durch die getroffenen Vereinfachungen weist das Modell hauptsächlich beim Schmelzverhalten und bei der Konvektion ein Fehlverhalten auf. Für das bessere Verständnis werden diese Fehlverhalten genauer beschrieben.

Schmelzverhalten

In der Realität weist das PCM in den verschiedenen Phasen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten auf. Im flüssigen Anteil ist die Wärmeleitfähigkeit grösser als im festen. Durch diese unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten ist hauptsächlich während dem Phasenübergang ein anderes Verhalten zu erwarten. Beim Phasenwechsel von fest zu flüssig wird das PCM zuerst in der Randschicht flüssig, wodurch die Wärmeleitfähigkeit zum noch festen PCM-Anteil erhöht wird. Beim Übergang von flüssig zu fest wird die Randschicht zuerst fest, wodurch sich die Wärmeleitung zum noch flüssigen Anteil verkleinert. In der Realität ist das Laden des PCMs schneller als das Entladen. Um dies realitätsnah zu simulieren müsste das Schmelzverhalten sowie die radiale Wärmeübertragung simuliert werden. (Regin u. a., 2008)

Konvektion

Die Strömung im PCM-Speicher ist in der Realität sehr komplex. Der grösste Fehler entsteht in den Fällen, in welchen eine freie Konvektion im HTF entsteht. Dies kommt vor, wenn eine Schicht kälter ist als die darunterliegende oder wenn die Temperatur des PCMs über der Temperatur des HTFs in derselben Schicht liegt. Da die freie Konvektion nicht als Strömung betrachtet wird, kann die Wärmeübergangszahl nicht über die vorliegende Strömung berechnet werden. Daher wird in den Schichten, in welchen kein Massenstrom vorliegt, eine Wärmeübergangszahl vorgegeben. In der vorliegenden Arbeit ist dies beim Laden der Fall. Der Massenstrom beim Laden führt zu einer Wärmeübergangszahl von ca. $38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Diese Wärmeübergangszahl wird auch in den Schichten verwendet, in welchen nur freie Konvektion vorliegt. In der Auswertung wirkt sich dieser Fehler nur beim Aufwärmen aus. Beim Abkühlvorgang werden die unteren Schichten zuerst gekühlt, dadurch entsteht keine freie Konvektion durch die Schichten. Die freie Konvektion durch die höheren Temperaturen in den PCM-Kugeln gegenüber dem HTF ist aufgrund der hohen Durchflussgeschwindigkeit vernachlässigbar klein.

Das Ziel dieser Arbeit ist nicht das PCM-Speicherverhalten so realistisch wie möglich, sondern so realistisch wie nötig zu modellieren, um die Einflüsse einzelner Parameter sowie das grundsätzliche Verhalten von PCM-Speichern zu verstehen.

3.1.2 Angenommene Speichergeometrien

Der Speicher wird in den Berechnungen als Zylinder betrachtet, wie in Abbildung 13 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die PCM-Kugeln ihre Position im Speicher nicht ändern.

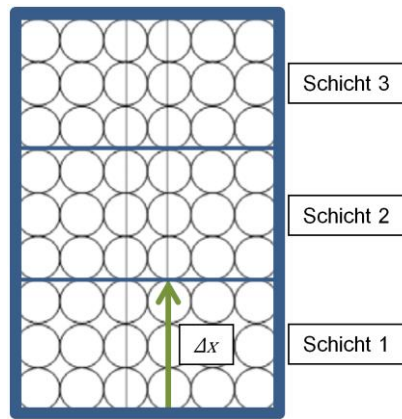


Abbildung 13: Schematische Darstellung des PCM-Speichers.

Berechnung der Speichergeometrien

Damit für das Modell sichergestellt ist, dass im Speicher nur geometrisch mögliche Bedingungen vorliegen, werden einzelne Größen über geometrische Abhängigkeiten berechnet. Der Speicher wird dazu in einzelne Schichten der Höhe Δx unterteilt (siehe Abbildung 13). Die maximale Füllichte $\eta_{\text{Füllichte}_{\text{max}}}$ einer Schicht berechnet sich über das Verhältnis zwischen PCM-Kugelvolumen und Speichervolumen bei der Höhe einer Kugel $V_{\text{Speicherbereich}}$ (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Darstellung einer Kugelschicht. In einer Kugelschicht wird die Füllichte über das Volumen aller darin enthaltenen Kugeln und dem Speichervolumen bei dieser Höhe berechnet.

Jede Kugelschicht beinhaltet gleichviele Kugeln. Dadurch entspricht die Füllichte von einer Kugelschicht der Füllichte einer Schicht. Über das Radiusverhältnis von Speicher zu PCM-Kugel wird die maximale Anzahl Kugeln pro Kugelschicht $n_{\text{querschnitt}}$ aus der Tabelle von Specht (2018) gelesen. Zur Veranschaulichung sind die Anordnungen von 10 bis 12 Kugeln in einer Schicht in Abbildung 15 dargestellt.

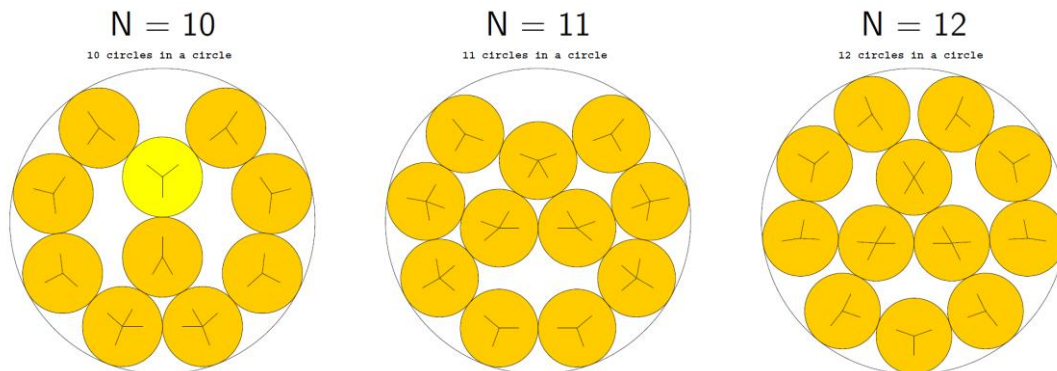


Abbildung 15: Maximale Anzahl Kugeln bei unterschiedlichen Radiusverhältnissen zwischen Speicher und PCM-Kugel (Specht, 2018).

Die maximale Füllichte wird über das Volumen aller Kugeln $V_{PCM\ Kugel}$ in dem Volumenbereich des Speichers bei der Höhe einer PCM-Kugel $V_{Speicherbereich}$ berechnet.

$$\eta_{Füllichte_{max}} = \frac{V_{PCM\ Kugel}}{V_{Speicherbereich}} = \frac{n_{querschnitt} * \frac{4}{3} * \pi * R_{PCM}^3}{R_{Speicher}^2 * \pi * 2 * R_{PCM}} = \frac{2 * n_{querschnitt} * R_{PCM}^2}{3 * R_{Speicher}^2} \quad [1]$$

Im Modell kann die Füllichte frei gewählt werden, dabei sollte $\eta_{Füllichte_{max}}$ nicht überschritten werden. Über die Füllichte wird das Volumen V_{PCM} und V_{HTF} in einer Schicht berechnet.

$$V_{PCM} = \eta_{Füllichte} * V_{Schicht} = \eta_{Füllichte} * R_{Speicher}^2 * \pi \quad [2]$$

$$V_{HTF} = (1 - \eta_{Füllichte}) * V_{Schicht} = (1 - \eta_{Füllichte}) * R_{Speicher}^2 * \pi \quad [3]$$

Über das Volumen und die Dichte werden die Massen m_{PCM} und m_{HTF} pro Schicht berechnet.

$$m_{PCM} = \rho_{PCM} * V_{PCM} \quad [4]$$

$$m_{HTF} = \rho_{HTF} * V_{HTF} \quad [5]$$

Der Wärmeaustausch zwischen HTF und PCM erfolgt über die Oberfläche aller Kugeln in einer Schicht A_{PCM} .

$$A_{PCM} = n_{Schicht} * \frac{4}{3} * \pi * R_{PCM}^3 \quad [6]$$

Damit die Schichthöhe unabhängig vom PCM-Radius gewählt werden kann, wird der Anteil der Kugeln in einer Schicht $n_{Schicht}$ verwendet.

$$n_{Schicht} = n_{Querschnitt} * \frac{\Delta x}{2 * R_{PCM}} \quad [7]$$

Zur Übersicht wird in Abbildung 16 der Verlauf der maximalen Füllichte und der Oberfläche bei unterschiedlichen Speicher/PCM-Radiusverhältnissen einer Schicht dargestellt. Die maximale Füllichte wird erreicht, wenn das Speicher/PCM-Radiusverhältnis 1:1 entspricht, sprich eine PCM-Kugel den ganzen Querschnitt abdeckt. Die dabei erreichte Füllichte beträgt 0.66. Beim Verhältnis von 2:1 wird das Minimum erreicht, anschliessend steigt die Füllichte mit zunehmendem Speicher/PCM-Radiusverhältnis an. Die PCM Oberfläche nimmt mit steigendem Speicher/PCM-Radiusverhältnis zu.

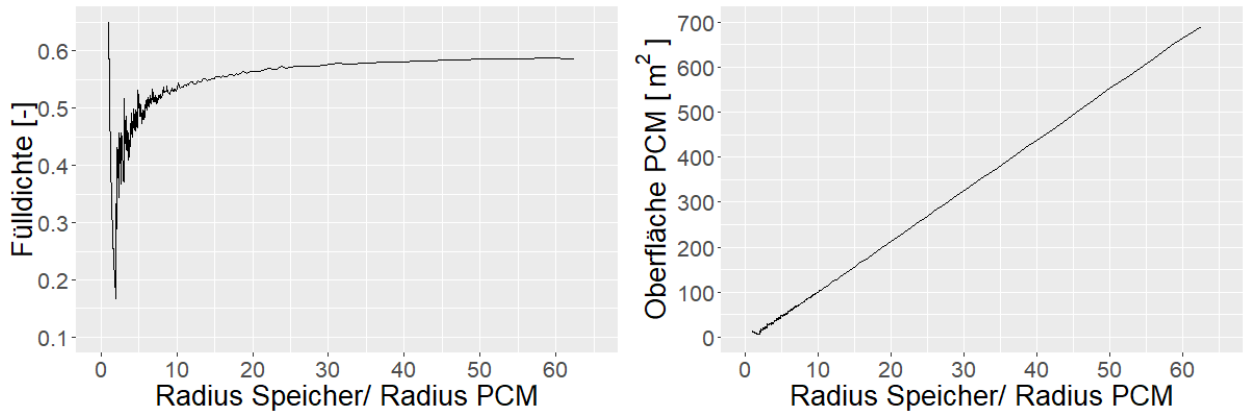


Abbildung 16: Verlauf der maximalen Füllichte (links) und der Oberfläche (rechts) in Funktion des Speicher/PCM-Radiusverhältnisses.

3.2 Beschreibung des Modells

Beim Modell findet in jeder Schicht ein Wärmeaustausch durch Wärmeleitung zwischen der vorhergehenden und der nachfolgenden Schicht $\frac{\partial Q_{Schicht}}{\partial t}$, zwischen Schicht und Umgebung $\frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t}$ und zwischen PCM und HTF $\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t}$ statt. Zusätzlich findet in jeder Schicht ein Wärmeaustausch durch den Massenstrom $\frac{\partial Q_{Massenstrom}}{\partial t}$ und die freie Konvektion $\frac{\partial Q_{freie Konv.}}{\partial t}$ statt. Die Wärmeänderung des HTFs in einer Schicht berechnet sich durch die folgende Differenzialgleichung:

$$\frac{\partial Q_{HTF}}{\partial t} = \frac{\partial Q_{Schicht}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{Massenstrom}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{freie Konv.}}{\partial t} \quad [8]$$

Die Wärmemenge, welche vom PCM zum HTF fließt entspricht der Wärmemenge, welche dem PCM entzogen wird und umgekehrt. Daher wird mit dem negativen Wert von $\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t}$ gerechnet.

$$\frac{\partial Q_{PCM}}{\partial t} = - \frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t} \quad [9]$$

In diesem Modell werden die Temperaturen schrittweise über Schlaufen berechnet. Damit beim PCM der Phasenübergang immer komplett betrachtet wird, wird bei der numerischen Umsetzung zu den drei Fällen (fest, Phasenübergang, flüssig), im Kapitel 3.2.3 für den Wechsel von einem Zustand in den Nächsten unterschieden. Bei der Verwendung eines Solvers werden die Zustandswechsel bereits bei den drei Fällen (fest, Phasenübergang, flüssig) richtig berücksichtigt.

Der PCM-Speicher wird mit einem sensiblen Speicher verglichen. In diesem berechnet sich die Wärmeänderung des HTFs in einer Schicht wie in Gl. [8] ohne $\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t}$. Dazu entspricht das HTF dem kompletten Speichervolumen.

3.2.1 Berechnung der HTF-Temperatur

Wärmeaustausch durch die Schichten

Beim ersten Term in Gl.[8] $\frac{\partial Q_{Schicht}}{\partial t}$ wird die Wärmeleitung durch eine Schicht zur oberen und zur unteren Schicht berechnet. Dabei wird nur die Wärmeleitung durch das HTF betrachtet. Für diese Betrachtung wird die Querschnittsfläche $A_{Speicher_{HTF}}$ berechnet.

$$A_{Speicher_{HTF}} = (1 - \eta_{Füllichte}) * A_{Speicher} \quad [10]$$

Die Querschnittsfläche $A_{Speicher_{HTF}}$ beschreibt die Fläche in welcher ausschliesslich HTF vorhanden ist. Dadurch kann bei der Wärmeleitung durch eine Schicht mit λ_{HTF} gerechnet werden. Die Wärmeleitung durch das PCM wird über den Wärmeaustausch zwischen PCM und HTF in $\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t}$ beschrieben. Weil nur die effektive Querschnittsfläche $A_{Speicher_{HTF}}$ berücksichtigt wird, wird die Wärmeleitung durch eine Schicht bei höherer PCM-Füllichte minimiert.

$$\frac{\partial Q_{Schicht}}{\partial t} = \frac{\lambda_{HTF}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * (T_{HTF_{x+1}} - T_{HTF_x}) + \frac{\lambda_{HTF}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * (T_{HTF_{x-1}} - T_{HTF_x}) \quad [11]$$

Wärmeaustausch durch die Speicherwand

Beim zweiten Term aus Gl.[8] $\frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t}$ wird angenommen, dass nur das HTF in direktem Kontakt mit der Wand ist. Bei der untersten und der obersten Schicht wird $\frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t}$ über die Fläche A_{Wand} berechnet. Bei den Schichten dazwischen wird $\frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t}$ über die Mantelfläche A_{Mantel} berechnet. Die Fläche A_{Wand} ergibt sich aus der Deckfläche und der Mantelfläche und A_{Mantel} ergibt sich aus dem Speicherumfang und der Schichtdicke.

$$A_{Wand} = A_{Mantel} + 2 * \pi * R_{Speicher} \quad [12]$$

$$A_{Mantel} = 2 * R_{Speicher} * \Delta x \quad [13]$$

Beim Wärmedurchgang wird für A A_{Wand} oder A_{Mantel} eingesetzt. Der Wärmedurchgang wird wie in einer ebenen Platte betrachtet.

$$\frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t} = \frac{\lambda_{Wand}}{\Delta x} * A * (T_{Raum} - T_{HTF}) \quad [14]$$

Wärmeaustausch zwischen PCM und HTF

Beim dritten Term aus Gl.[8] $\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t}$ wird der Wärmeaustausch zwischen PCM und HTF wie folgt berechnet:

$$\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t} = \alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF}) \quad [15]$$

Dabei wird $\alpha_{PCM \rightarrow HTF}$ nach Verein Deutscher Ingenieure & Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2013) berechnet.

Wärmeaustausch durch den Massenstrom

Der vierte Term von Gl.[8] $\frac{\partial Q_{Massenstrom.}}{\partial t}$ wird über den Massenstrom berechnet. Der gleiche Massenstrom, der in die Schicht fließt, fließt auch aus der Schicht. Dadurch wird die Temperatur der Schicht T_{HTF_x} von der Temperatur der vorhergehenden Schicht $T_{HTF_{x-1}}$ abgezogen.

$$\frac{\partial Q_{Massenstrom}}{\partial t} = \dot{m}_{HTF} * c_{p HTF} * (T_{HTF_{x-1}} - T_{HTF_x}) \quad [16]$$

In der Schicht, in welcher das HTF zugeführt wird, wird die zugeführte Temperatur T_{zu} verwendet.

$$\frac{\partial Q_{Massenstrom_{zu}}}{\partial t} = \dot{m}_{HTF} * c_{p HTF} * (T_{zu} - T_{HTF_x}) \quad [17]$$

Falls die Flussrichtung Schicht abwärtsverläuft, wird die Temperatur der darüber liegenden Schicht $T_{HTF_{x+1}}$ verwendet.

$$\frac{\partial Q_{Massenstrom.}}{\partial t} = \dot{m}_{HTF} * c_{p HTF} * (T_{HTF_{x+1}} - T_{HTF_x}) \quad [18]$$

Wärmeaustausch durch freie Konvektion

Der fünfte Term $\frac{\partial Q_{freie Konv.}}{\partial t}$ berechnet den durch freie Konvektion entstehenden Wärmeaustausch. Dieser wird vereinfacht und nur im HTF betrachtet. Die vereinfachte Betrachtung folgt nach «Modell 2» aus Leonhardt (2016). Dabei wird davon ausgegangen, dass das PCM die Position im Speicher nicht ändert. Die freie Konvektion wird als zusätzliche Wärmeleitung zwischen den Schichten definiert, falls $T_{HTF_x} > T_{HTF_{x+1}}$ ist. Dann wird $\frac{\partial Q_{freie Konv.}}{\partial t}$ über den Parameter $\lambda_{Auftrieb}$ berechnet.

$$\dot{Q}_{freie Konvektion} = \frac{\lambda_{Auftrieb}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * (T_{HTF_x} - T_{HTF_{x+1}}) \quad [19]$$

Die freie Konvektion wird in eine zugeführte und eine abgeführte Konvektion unterteilt. Falls $T_{HTF_x} > T_{HTF_{x+1}}$ wird bei $T_{HTF_{x+1}}$ die Wärme $\dot{Q}_{freie Konvektion}$ zugeführt und bei T_{HTF_x} abgeführt. Die betrachtete Wärmeleitung $\lambda_{Auftrieb}$ wird temperaturabhängig berechnet. Es gilt:

$$\Delta T = T_{HTF_x} - T_{HTF_{x+1}}$$

$$\lambda_{Auftrieb} = 0 \text{ für } \frac{\Delta T}{\Delta x} \geq 0$$

$$\lambda_{Auftrieb} = c_1 * x^2 * \sqrt{-g * \beta * \frac{\Delta T}{\Delta x}} \text{ für } \frac{\Delta T}{\Delta x} < 0 \quad [20]$$

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ ist die Temperaturänderung pro Schicht. c_1 ist von den Stoffeigenschaften des HTFs abhängig und berechnet sich wie folgt:

$$c_1 = \frac{2}{3} * \rho * c_p * \kappa \quad [21]$$

$$c_{Wasser} = \frac{2}{3} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 4.185 \frac{kJ}{kg * K} * 0.4 = 1'116 \frac{kJ}{m^3 * K}$$

$\lambda_{Auftrieb}$ entspricht bei eingesetzten Stoffeigenschaften von Wasser:

$$\lambda_{Auftrieb} = 1'116 \frac{kJ}{m^3 * K} * x^2 * \sqrt{-9.81 \frac{m}{s^2} * 2.07 * 10^{-4} \frac{1}{K} * \frac{\Delta T}{\Delta x}}$$

Wärmeänderung

Die in einer Schicht stattfindende Wärmeänderung $\frac{\partial Q_{HTF}}{\partial t}$ kann über die Wärmekapazität und die Temperaturänderung wie folgt definiert werden:

$$\frac{\partial Q_{HTF}}{\partial t} = C_{HTF} * \frac{\partial T_{HTF}}{\partial t} \quad [22]$$

Das Einsetzen von Gl. [22] in Gl. [8] ergibt das Gleichungssystem für die Temperaturänderung in einer Schicht.

$$\frac{\partial Q_{HTF}}{\partial t} = C_{HTF} * \frac{\partial T_{HTF}}{\partial t} = \frac{\partial Q_{Wärmeleitung}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{Massenstrom}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{freie Ko}}{\partial t} \quad [23]$$

Die Diskretisierung erfolgt durch die schrittweise Betrachtung der zeitlichen Veränderung. Dadurch ergibt sich für $T_{HTF_{t+1}}$:

$$C_{HTF} * \frac{T_{HTF_{t+1}} - T_{HTF_t}}{\Delta t} = \Delta \dot{Q}_{Wärmeleitung} + \Delta \dot{Q}_{Wand} + \Delta \dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} + \Delta \dot{Q}_{erzw. Konv.} + \Delta \dot{Q}_{freie Konv.}$$

$$T_{HTF_{t+1}} = \Delta t * \frac{\Delta \dot{Q}_{Wärmeleitung} + \Delta \dot{Q}_{Wand} + \Delta \dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} + \Delta \dot{Q}_{erzw. Konv.} + \Delta \dot{Q}_{freie Konv.}}{C_{HTF}} + T_{HTF_t} \quad [24]$$

3.2.2 Berechnung der PCM-Temperatur

$\frac{\partial Q_{PCM}}{\partial t}$ lässt sich auch aufgrund der Temperaturänderung berechnen. Dabei hängt die Berechnung von dem Zustand des PCMs ab. Somit wird die Temperaturänderung in fest, Phasenübergang und flüssig unterteilt.

Fest

In der festen Phase kann die zeitliche Wärmeänderung über die zeitliche Temperaturänderung berechnet werden.

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_{PCM_{fest}}}{\partial t} &= C_{PCM_{fest}} * \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} \\ C_{PCM_{fest}} * \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} &= -\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF}) \\ \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} &= \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{C_{PCM_{fest}}}\end{aligned}\quad [25]$$

Die Diskretisierung erfolgt durch die schrittweise Betrachtung der zeitlichen Veränderung. Dadurch ergibt sich für die PCM-Temperatur nach dem Zeitschritt $T_{PCM_{t+1}}$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} &= \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{PCM_t}}{\Delta t} = \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{C_{PCM_{fest}}} \\ T_{PCM_{t+1}} &= \Delta t * \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{C_{PCM_{fest}}} + T_{PCM_t}\end{aligned}\quad [26]$$

Phasenübergang

Der Phasenübergang findet in einem Schmelzbereich statt, wodurch die zeitliche Wärmeänderung als Temperaturabhängig betrachtet werden kann. Durch die Variable $\eta_{flüssig}$ kann der Anteil der flüssigen Phase im Phasenübergang abhängig von der Temperaturänderung berechnet werden (Dincer & Rosen, 2010).

$$\eta_{flüssig} = \frac{T_{PCM} - T_{Solidus}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} \quad [27]$$

Für die Ableitung von $\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t}$ wird $\frac{\partial T_{PCM} - \partial T_{Solidus}}{\partial t}$ nach der Zeit abgeleitet:

$$\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t} = \frac{\partial T_{PCM} - \partial T_{Solidus}}{\partial t} * \frac{1}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} \quad [28]$$

Dabei gilt $T_{Solidus} = const. \rightarrow \frac{\partial T_{Solidus}}{\partial t} = 0$, wodurch sich die folgende Ableitung für $\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t}$ ergibt.

$$\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t} = \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * \frac{1}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} \quad [29]$$

$\frac{\partial Q_{PCM_{Phasenübergang}}}{\partial t}$ berechnet sich aus der Schmelzwärme $\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t} * m_{PCM} * \sigma_{PCM}$ und der Wärmekapazität $\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * C_{PCM_{fest}}$ durch die Temperatursteigerung.

$$\frac{\partial Q_{PCM_{latent}}}{\partial t} = \frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t} * m_{PCM} * \sigma_{PCM} + \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * C_{PCM_{fest}} \quad [30]$$

Die Gl. [30] wird mit der Wärmeänderung der Gl. [9] gleichgesetzt.

$$\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t} * m_{PCM} * \sigma_{PCM} + \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * C_{PCM_{fest}} = -\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF}) \quad [31]$$

Dazu wird für $\frac{\partial \eta_{flüssig}}{\partial t}$ Gl. [29] eingesetzt und nach $\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t}$ aufgelöst.

$$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * \frac{m_{PCM} * \sigma_{PCM}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} + \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * C_{PCM_{fest}} = -\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})$$

$$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} * \left(\frac{m_{PCM} * \sigma_{PCM}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} + C_{PCM_{fest}} \right) = -\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})$$

$$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} = \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{\left(\frac{m_{PCM} * \sigma_{PCM}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} + C_{PCM_{fest}} \right)} \quad [32]$$

Die Diskretisierung erfolgt durch die schrittweise Betrachtung der zeitlichen Veränderung. Dadurch ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} &= \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{PCM_t}}{\Delta t} = \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{\left(\frac{m_{PCM} * \sigma_{PCM}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} + C_{PCM_{fest}} \right)} \\ T_{PCM_{t+1}} &= \Delta t * \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{\left(\frac{m_{PCM} * \sigma_{PCM}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} + C_{PCM_{fest}} \right)} + T_{PCM_t} \end{aligned} \quad [33]$$

Flüssig

In der flüssigen Phase kann die zeitliche Wärmeänderung über die zeitliche Temperaturänderung berechnet werden.

$$\frac{\partial Q_{PCM_{flüssig}}}{\partial t} = C_{PCM_{flüssig}} * \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t}$$

$$C_{PCM_{flüssig}} * \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} = -\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})$$

$$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} = \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{C_{PCM_{flüssig}}} \quad [34]$$

Die Diskretisierung erfolgt durch die schrittweise Betrachtung der zeitlichen Veränderung. Dadurch ergibt sich:

$$\frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} = \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{PCM_t}}{\Delta t} = \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{C_{PCM_{flüssig}}}$$

$$T_{PCM_{t+1}} = \Delta t * \frac{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})}{C_{PCM \text{ flüssig}}} + T_{PCM_t} \quad [35]$$

3.2.3 Weitere Fallunterscheidungen

Wenn nur die drei Zustände unterschieden werden, werden die Übergänge von einer Phase zur nächsten bei dem erstellten Simulationsmodell nicht realitätsgemäss berücksichtigt, weil das Modell über Schleifen rechnet. Bei der Verwendung von Solver werden keine weiteren Fallunterscheidungen benötigt. In Abbildung 17 wird die Problematik veranschaulicht. Die blaue Kurve soll durch die Simulation nachgebildet werden. Bei dieser Darstellung wird bei jedem Zeitschritt die Temperatur für den nächsten Zeitschritt berechnet. Die rote Kurve veranschaulicht das Simulationsverhalten, wenn drei Fälle (fest, Phasenübergang, flüssig) unterschieden werden. Dabei kann ein Zeitschritt kurz vor der Zustandsänderung beginnen, wodurch für den ganzen Zeitschritt die Temperaturänderung für den Zustand zu Beginn des Zeitschrittes simuliert wird. Um dies zu verhindern, werden bei der numerischen Umsetzung vier weitere Fälle dem Modell hinzugefügt. Diese Fälle beziehen sich auf die Zustandsänderungen (fest → Phasenübergang, Phasenübergang → fest, flüssig → Phasenübergang, Phasenübergang → flüssig) in einem Zeitschritt. Dabei wird wie bei den obengenannten drei Fällen die Temperatur für den nächsten Zeitschritt anhand der Starttemperatur eines Zeitschrittes berechnet. Falls jedoch die Endtemperatur eines Zeitschrittes in einer anderen Phase liegt, wird die benötigte Energie bis zur nächsten Phase berechnet und von dem stattfindenden Wärmeaustausch abgezogen. Anschliessend wird der restliche Wärmeaustausch des Zeitschrittes in der neuen Phase berechnet. Dieser Fall ist in Abbildung 17 in grün dargestellt. Zwischen dem Zeitschritt 1 und 2 verläuft die Kurve über die Zustandsänderung direkt auf die blaue Kurve.

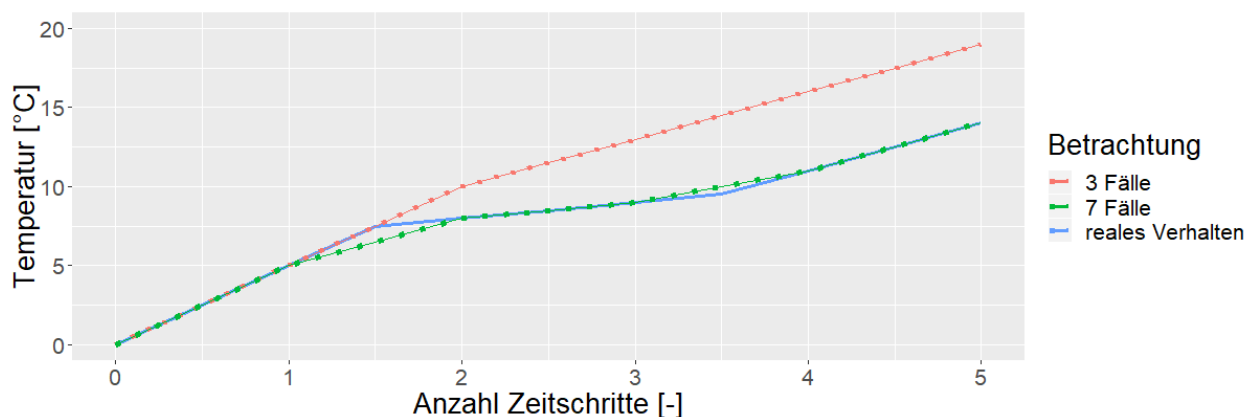


Abbildung 17: In blau ist der Temperaturverlauf dargestellt, wie er sich in der Realität verhält. Die rote Linie stellt den Temperaturverlauf bei der Berücksichtigung der drei Fälle dar. Die grüne Linie stellt den Temperaturverlauf bei der Berücksichtigung von sieben Fällen dar.

Da eine Temperaturänderung im Phasenübergang viel mehr Wärme benötigt als im festen oder flüssigen Zustand, muss der Phasenübergang immer komplett berücksichtigt werden.

Bei der Fallunterscheidung wird zuerst überprüft, in welchem Temperaturbereich das PCM liegt. Anschliessend wird für diesen Fall (fest, Phasenübergang oder flüssig) die Temperatur T berechnet. Durch Temperatur T wird die nächste Fallunterscheidung getroffen.

Falls $T_{PCM_t} < T_{solidus}$ und $T \leq T_{solidus}$ wird $T_{PCM_{t+1}} = T$.

Falls $T_{PCM_t} < T_{solidus}$ und $T > T_{solidus}$ kann nur bis $T_{PCM_{t+1}} = T_{solidus}$ mit der Formel für den festen Zustand gerechnet werden. Anschliessend muss mit der Formel im Phasenübergang gerechnet werden.

In Fällen wo T einen anderen Zustand als T_{PCM_t} aufweist, wird jeweils von der folgenden Grundgleichung ausgegangen.

$$\dot{Q}_{flüssig_{t+1}} + \dot{Q}_{Phasenübergang_{t+1}} + \dot{Q}_{fest_{t+1}} = -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \dot{Q}_{flüssig_t} + \dot{Q}_{Phasenübergang_t} + \dot{Q}_{fest_t} \quad [36]$$

Anschliessend werden für die einzelnen Fälle jeweils die Anteile herausgestrichen, welche gleich oder gleich 0 sind.

Z.B. $T_{PCM} < T_{solidus}$, $T_{solidus} < T$

Im Beispiel gilt $\dot{Q}_{flüssig_{t+1}} = \dot{Q}_{flüssig_t} = \dot{Q}_{Phasenübergang_t} = 0$ wodurch sich die folgende Gleichung ergibt.

$$\dot{Q}_{Phasenübergang_{t+1}} + \dot{Q}_{fest_{t+1}} = -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \dot{Q}_{fest_t}$$

Das Modell berücksichtigt nicht die Fälle, in welchen das PCM in einem Zeitschritt von fest zu flüssig oder von flüssig zu fest wechselt. Dieser Fall ist sehr unrealistisch.

Zur besseren Verständlichkeit werden in den Formeln folgende Terme substituiert, da sich diese in den Formeln nicht ändern.

$$\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} = \alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A_{PCM} * (T_{PCM} - T_{HTF})$$

$$C_{Phasenübergang} = \left(\frac{m_{PCM} * \sigma_{PCM}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} + C_{PCM_{fest}} \right)$$

Fest zu Phasenübergang

Das PCM ist fest, es wird so viel Wärme zugeführt, dass es in den Phasenübergang wechselt.

$$\dot{Q}_{Phasenübergang_{t+1}} + \dot{Q}_{fest_{t+1}} = -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \dot{Q}_{fest_t}$$

$$\frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} + \frac{C_{PCM_{fest}} * (T_{Solidus} - T_{Ref})}{\Delta t} = -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{C_{PCM_{fest}} * (T_{PCM_t} - T_{Ref})}{\Delta t}$$

$$\frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} = -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{C_{PCM_{fest}} * (T_{PCM_t} - T_{Solidus})}{\Delta t}$$

$$T_{PCM_{t+1}} = \Delta t * \frac{-\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{C_{PCM_{fest}} * (T_{PCM_t} - T_{Solidus})}{\Delta t}}{C_{Phasenübergang}} + T_{Solidus} \quad [37]$$

Phasenübergang zu fest

Das PCM befindet sich im Phasenübergang, es wird so viel Wärme entzogen, dass es in den festen Zustand wechselt.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{fest_{t+1}} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \dot{Q}_{Phasenübergang_t} + \dot{Q}_{fest_t} \\ C_{PCM_{fest}} * \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{Ref}}{\Delta t} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{T_{PCM_t} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} + C_{PCM_{fest}} * \frac{T_{Solidus} - T_{Ref}}{\Delta t} \\ T_{PCM_{t+1}} &= \Delta t * \frac{-\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{T_{PCM_t} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang}}{C_{PCM_{fest}}} + T_{Solidus} \end{aligned} \quad [38]$$

Flüssig zu Phasenübergang

Das PCM ist flüssig, es wird so viel Wärme entzogen, dass es in den Phasenübergang wechselt.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{Phasenübergang_{t+1}} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \dot{Q}_{flüssig_t} + \dot{Q}_{Phasenübergang_t} \\ \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + C_{PCM_{flüssig}} * \frac{T_{PCM_t} - T_{Liquidus}}{\Delta t} + \frac{T_{Liquidus} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} \\ T_{PCM_{t+1}} &= \Delta t * \frac{-\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + C_{PCM_{flüssig}} * \frac{T_{PCM_t} - T_{Liquidus}}{\Delta t}}{C_{Phasenübergang}} + T_{Liquidus} \end{aligned} \quad [39]$$

Phasenübergang zu flüssig

Das PCM befindet sich im Phasenübergang, es wird so viel Wärme zugefügt, dass es flüssig wird.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{flüssig_{t+1}} + \dot{Q}_{Phasenübergang_{t+1}} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \dot{Q}_{Phasenübergang_t} \\ C_{PCM_{flüssig}} * \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{Liquidus}}{\Delta t} + \frac{T_{Liquidus} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{T_{PCM_t} - T_{Solidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} \\ C_{PCM_{flüssig}} * \frac{T_{PCM_{t+1}} - T_{Liquidus}}{\Delta t} &= -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{T_{PCM_t} - T_{Liquidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang} \\ T_{PCM_{t+1}} &= \Delta t * \frac{-\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF_t} + \frac{T_{PCM_t} - T_{Liquidus}}{\Delta t} * C_{Phasenübergang}}{C_{PCM_{flüssig}}} + T_{Liquidus} \end{aligned} \quad [40]$$

3.3 Plausibilisierung

Zur Überprüfung, ob das simulierte Verhalten physikalisch nachvollziehbar ist, wird das Modell plausibilisiert. In der Plausibilisierung werden die einzelnen Wärmeänderungen isoliert betrachtet,

damit mit einer einfachen, analytischen Formel die einzelnen Wärmeänderungen beschrieben werden können. Durch den Vergleich zwischen der analytischen und der numerischen Kurve wird überprüft, ob sich das numerische Verhalten der einzelnen Wärmeaustausche erwartungsgemäss verhält. Grundsätzlich werden zwei Fälle unterschieden.

1. Beide Temperaturen sind veränderlich. Die analytische Herleitung erfolgt nach Böckh & Wetzel (2011b). In diesem Fall wird der Temperaturunterschied dargestellt. Dieser Fall tritt bei den folgenden Wärmeaustauschen ein:

- $\frac{\partial Q_{Schicht}}{\partial t}$
- $\frac{\partial Q_{freie\ Konv.}}{\partial t}$
- $\frac{\partial Q_{PCM \rightarrow HTF}}{\partial t}$

2. Nur eine Temperatur verändert sich, die andere bleibt konstant. Die analytische Herleitung erfolgt nach Böckh & Wetzel (2011a). In diesem Fall wird die veränderliche Temperatur dargestellt. Dieser Fall tritt bei den folgenden Wärmeaustauschen ein:

- $\frac{\partial Q_{Wand}}{\partial t}$
- $\frac{\partial Q_{Massenstrom}}{\partial t}$

Dabei wird das Modell jeweils mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s, 10 s und 60 s simuliert. In der Simulation werden die gleichen Werte wie in der Formel eingesetzt. Es werden alle Wärmeänderungen einzeln plausibilisiert. Dieser Vergleich dient zur Überprüfung, ob im Modell die Formel richtig implementiert wurde. Die zur Überprüfung eingesetzten Werte sind frei gewählt.

Falls die Wärmeausbreitung im Speicher untersucht werden muss, werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Formel für unterschiedliche Fälle richtig implementiert wurde.

3.3.1 Wärmeaustausch durch die Schichten

Es liegen zwei Schichten mit unterschiedlichen Temperaturen aufeinander (siehe Abbildung 18).

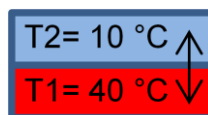


Abbildung 18: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches durch die Schicht.

Der einzige Temperaturaustausch erfolgt über die Querschnittsfläche $A_{\text{Speicher}_{HTF}}$. Beide Schichten bestehen aus demselben Material und weisen dasselbe Volumen auf. Der von der wärmeren Schicht abgegebene Wärmestrom ist die zeitliche Änderung der Enthalpie dieser Schicht.

$$\dot{Q}_{Schicht} = C * \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad [41]$$

Der von der kälteren Schicht aufgenommene Wärmestrom ist entgegengesetzt gleich gross:

$$-\dot{Q}_{Schicht} = C * \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad [42]$$

Die Wärmeübergangszahl und die Temperaturdifferenz bestimmen den Wärmestrom zwischen den Schichten.

$$\dot{Q}_{Schicht} = \frac{\lambda_{HTF}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * (T_1 - T_2) \quad [43]$$

Die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Schicht wird aus Gl. [41] und Gl. [42] berechnet:

$$\partial(T_1 - T_2) = -\dot{Q}_{Schicht} \left[\frac{1}{C} + \frac{1}{C} \right] * \partial t \quad [44]$$

Der Wärmestrom aus Gl. [43] kann in Gl. [44] eingesetzt werden.

$$\frac{\partial(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2} = -\frac{\lambda_{HTF}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * \frac{2}{C} * \partial t \quad [45]$$

Alles ausser den Temperaturen ist konstant. Daher kann Gl. [45] von der Zeit $t = 0$ bis t und von den Anfangstemperaturen T_{A1} und T_{A2} bis zu den Temperaturen T_1 und T_2 integriert werden.

$$\ln \frac{(T_1 - T_2)}{T_{A1} - T_{A2}} = -\frac{\lambda_{HTF}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * \frac{2}{C} * t \quad [46]$$

Die Temperaturdifferenz zwischen den Schichten entspricht:

$$T_1 - T_2 = (T_{A1} - T_{A2}) * e^{-\frac{\lambda_{HTF}}{\Delta x} * A_{Speicher_{HTF}} * \frac{2}{C} * t} \quad [47]$$

Für die Plausibilisierung wird der folgende Fall simuliert:

$$T_1 - T_2 = (40^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) * e^{-\frac{100 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0.25 \text{ m}} * 0.8 \text{ m}^2 * \frac{2}{800 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}}} * t$$

Zur Überprüfung wird diese Funktion mit den simulierten Temperaturverläufen geplottet (siehe Abbildung 19 rechts). Es wird der Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen einer 40 °C und einer 10 °C warmen Schicht geplottet. Somit startet die Temperaturdifferenz bei 30 °C und nähert sich 0 °C.

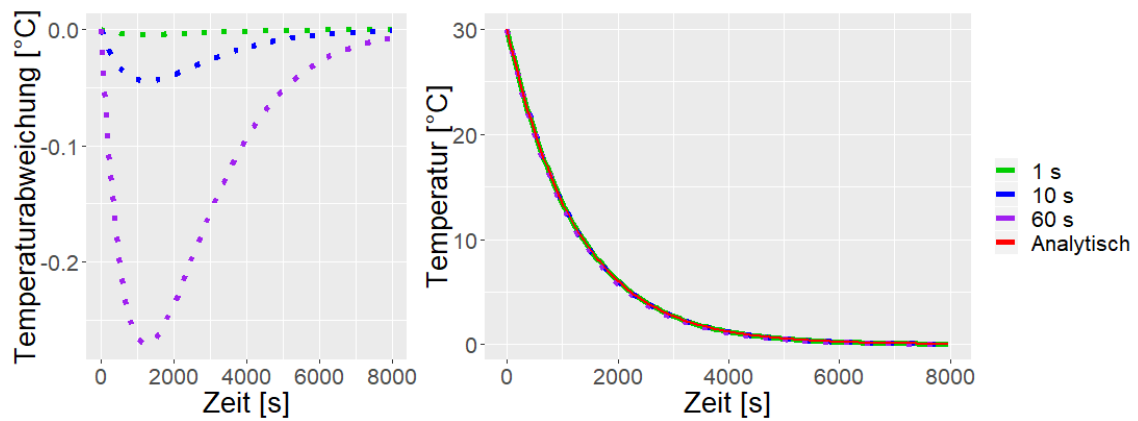


Abbildung 19: Temperaturabweichung von den simulierten Werten mit unterschiedlicher Zeitauflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen einer 40 °C und einer 10 °C warmen Schicht, wenn nur der Temporaustausch durch Wärmeleitung zwischen den Schichten berücksichtigt wird (rechts).

In der Abbildung 19 rechts wird ersichtlich, dass sich alle Kurven ähnlich verhalten und nahe beieinander liegen. Zur zusätzlichen Überprüfung wird in Abbildung 19 links die Abweichung der simulierten Temperaturverläufe zum analytisch berechneten Temperaturverlauf dargestellt. In Abbildung 19 links wird ersichtlich, dass die Genauigkeit des Modells bei grösseren Zeitschritten abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über eine längere Zeitspanne mit einer gleichbleibenden Temperaturdifferenz gerechnet wird.

Es wird zusätzlich überprüft, ob die Wärmeleitung richtig implementiert wurde und sich die Temperatursausbreitung im Speicher realistisch verhält. Der Temporaustausch einer Schicht muss sich gleichmässig auf die anderen Schichten ausbreiten. Zur Überprüfung wird folgender Fall simuliert: Alle Schichten starten bei 20 °C ausser S5 bei 30 °C (siehe Abbildung 20). Dabei wird ersichtlich, dass sich die Temperatur von S5 gleichmässig in den restlichen Schichten ausbreitet.

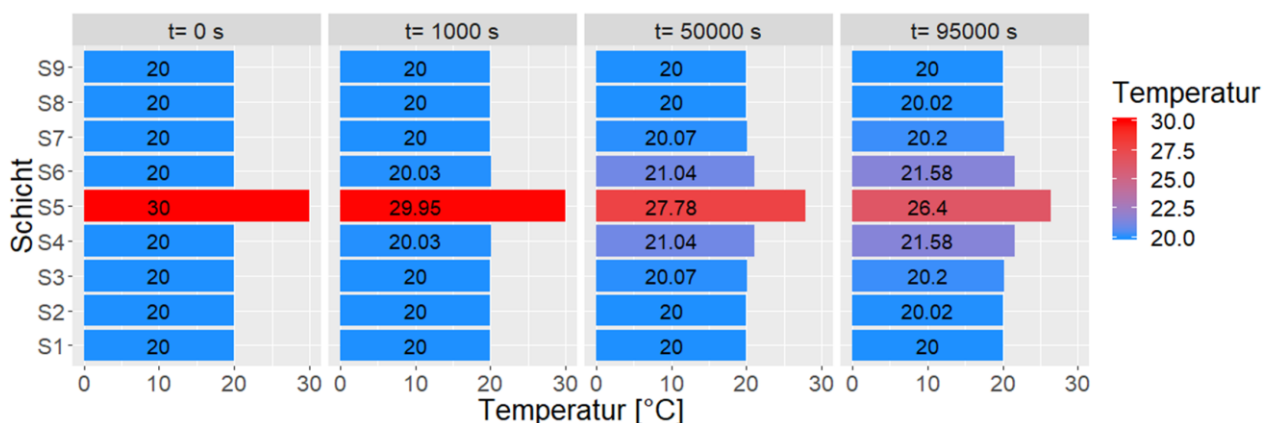


Abbildung 20: Darstellung der Temperatursausbreitung, wenn nur die Wärmeleitung durch die Schichten berücksichtigt wird. Zur Veranschaulichung von kleinen Temperaturänderungen stehen in den Balken jeweils die Temperaturen der einzelnen Schichten zur angegebenen Zeit.

3.3.2 Wärmeaustausch durch freie Konvektion

Der Wärmeaustausch durch freie Konvektion erfolgt wie im Kapitel 3.3.1, dabei wurde die analytische Formel bereits bestätigt. Es wird die Implementierung der Formel überprüft. Dabei

startet die mittlere Schicht bei 30 °C und die restlichen Schichten bei 20 °C. Abbildung 21 veranschaulicht, dass die Temperatur nach oben geleitet wird, falls die obere Schicht kälter ist.

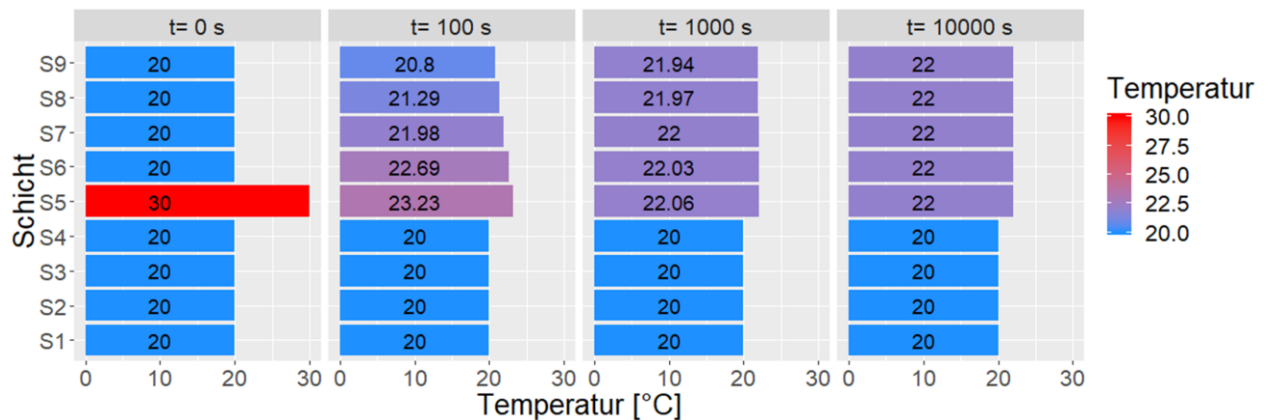


Abbildung 21: Darstellung der Temperaturentwicklung, wenn nur die freie Konvektion berücksichtigt wird. In den Balken stehen jeweils die Temperaturen der einzelnen Schichten zur angegebenen Zeit.

Vergleich von Wärmeleitung und der freien Konvektion

Zum Vergleichen der Einflüsse von Wärmeleitung und der freien Konvektion wird der gleiche Fall wie in Abbildung 21 bei freier Konvektion und Wärmeleitung simuliert. In Abbildung 22 wird ersichtlich, dass sich die Wärme über die freie Konvektion viel schneller ausbreitet als durch die Wärmeleitung. Dies ist auch aus dem Vergleich zwischen Abbildung 20 und Abbildung 21 ersichtlich. In Abbildung 20 hat sich S5 nach 95'000 s von 30 °C auf 26.4 °C abgekühlt. In Abbildung 21 hat S5 bereits nach 10'000 s 22 °C erreicht.

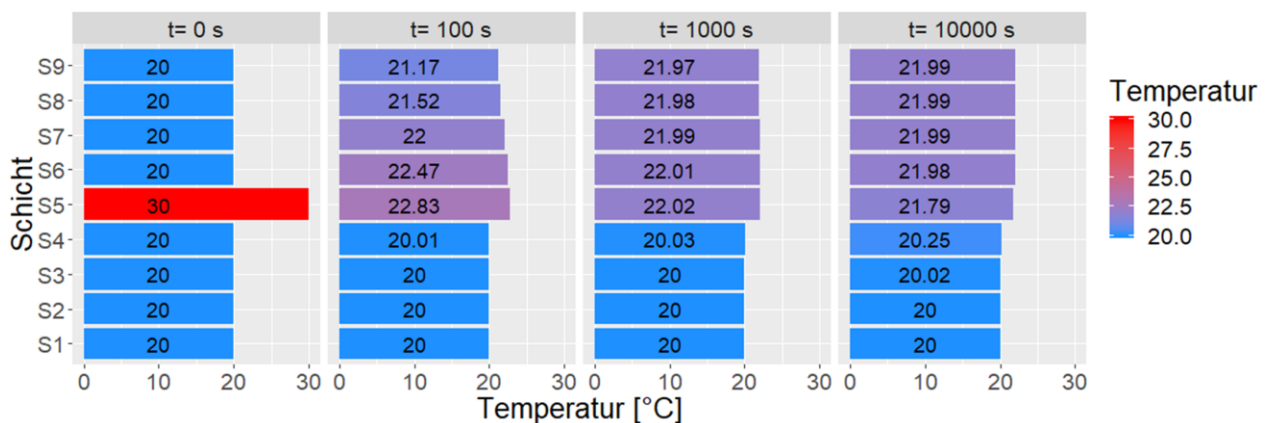


Abbildung 22: Darstellung der Temperaturentwicklung, wenn die freie Konvektion und die Wärmeleitung berücksichtigt werden. In den Balken stehen jeweils die Temperaturen der einzelnen Schichten zur angegebenen Zeit.

3.3.3 Wärmeaustausch von PCM zum HTF

Das PCM liegt mit einer unterschiedlichen Temperatur im HTF (siehe Abbildung 23). Dabei hat das PCM eine andere Wärmekapazität als das HTF.

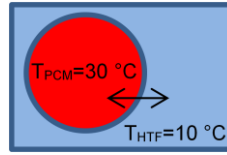


Abbildung 23: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches zwischen PCM und HTF.

Einfachheitshalber wird der Phasenübergang bei dieser analytischen Überprüfung nicht berücksichtigt. Im Speicher nähern sich beide Temperaturen gegenseitig an. Der vom PCM abgegebene Wärmestrom ist die zeitliche Änderung der Enthalpie des PCMs.

$$-\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} = C_{PCM} * \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} \quad [48]$$

Der vom HTF aufgenommene Wärmestrom ist entgegengesetzt gleich gross.

$$\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} = C_{HTF} * \frac{\partial T_{HTF}}{\partial t} \quad [49]$$

Die Wärmeübergangszahl und die Temperaturdifferenz bestimmen den Wärmestrom zwischen T_{HTF} und T_{PCM} .

$$\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} = \alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A * (T_{PCM} - T_{HTF}) \quad [50]$$

Für die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen T_{HTF} und T_{PCM} wird aus Gl. [48] und Gl. [49] berechnet:

$$\partial(T_{PCM} - T_{HTF}) = -\dot{Q}_{PCM \rightarrow HTF} * \left[\frac{1}{C_{PCM}} + \frac{1}{C_{HTF}} \right] * \partial t \quad [51]$$

Der Wärmestrom aus Gl. [50] kann in Gl. [51] eingesetzt werden.

$$\frac{\partial(T_{PCM} - T_{HTF})}{T_{PCM} - T_{HTF}} = * A * \left[\frac{1}{C_{PCM}} + \frac{1}{C_{HTF}} \right] * \partial t \quad [52]$$

Alles ausser den Temperaturen ist konstant. Daher kann Gl. [52] von der Zeit $t = 0$ bis t und von den Anfangstemperaturen T_{APCM}, T_{AHTF} bis zu den Temperaturen T_{PCM}, T_{HTF} integriert werden.

$$\ln \frac{(T_{PCM} - T_{HTF})}{T_{APCM} - T_{AHTF}} = -\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A * \left[\frac{1}{C_{PCM}} + \frac{1}{C_{HTF}} \right] * t \quad [53]$$

Die Temperaturdifferenz zwischen T_{PCM} und T_{HTF} entspricht:

$$(T_{PCM} - T_{HTF}) = (T_{APCM} - T_{AHTF}) * e^{-\alpha_{PCM \rightarrow HTF} * A * \left[\frac{1}{C_{PCM}} + \frac{1}{C_{HTF}} \right] * t} \quad [54]$$

Zur Plausibilisierung wird der folgende Fall simuliert:

$$(T_{PCM} - T_{HTF}) = (40 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) * e^{-60 \frac{W}{m^2 * K} * 2 \text{ m}^2 * \left[\frac{1}{200 \frac{kJ}{K}} + \frac{1}{800 \frac{kJ}{K}} \right] * t}$$

In Abbildung 24 wird nur die Temperaturdifferenz zwischen T_{HTF} und T_{PCM} untersucht.

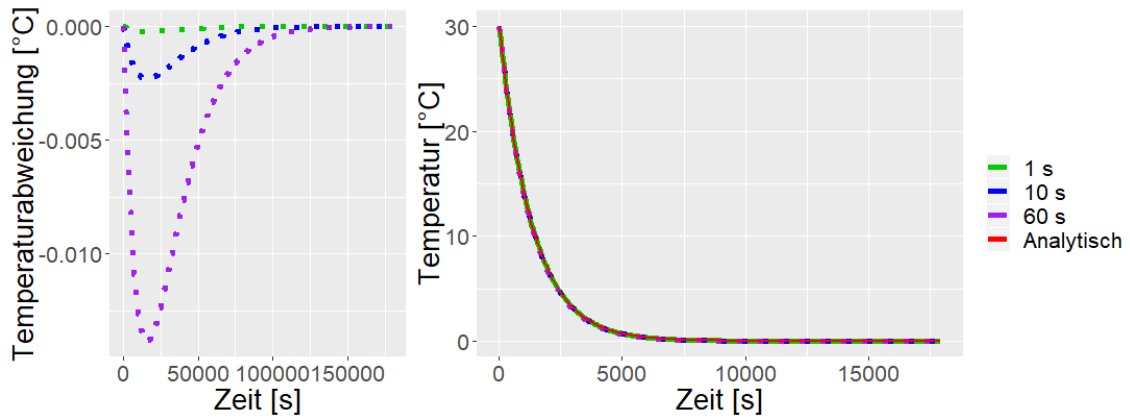


Abbildung 24: Temperaturabweichung von simulierten Werten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen 40 °C warmem PCM und 10 °C kaltem HTF, wenn nur der Temporaustausch zwischen PCM und HTF berücksichtigt wird (rechts).

Die Formel im Modell für den Temporaustausch unter der Berücksichtigung von einer konstanten Wärmekapazität stimmt somit. Es wird zusätzlich überprüft, ob die Fallunterscheidungen beim Erwärmen und Kühlen vom PCM richtig implementiert wurden. Dazu wird auch der Temperaturverlauf bei nur drei Fällen dargestellt.

Erwärmung PCM

In diesem Fall startet das PCM mit einer tieferen Temperatur als das HTF. Dazu wird die Temperatur, welcher sich das HTF und das PCM annähern, $T_{Meeting}$ durch das Gleichsetzen der Wärmeinhalte wie folgt berechnet.

$$Q_{PCM_{flüssig}} + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + Q_{PCM_{fest}} = Q_{HTF_{flüssig}}$$

$$C_{PCM_{flüssig}} * (T_{Meeting} - T_{Liquid}) + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + C_{PCM_{fest}} * (T_{Solid} - T_{PCM_{Start}}) = C_{HTF_{flüssig}} * (T_{HTF_{Start}} - T_{Meeting})$$

$$C_{PCM_{flüssig}} * T_{Meeting} - C_{PCM_{flüssig}} * T_{Liquid} + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + C_{PCM_{fest}} * (T_{Solid} - T_{PCM_{Start}}) = C_{HTF_{flüssig}} * T_{HTF_{Start}} - C_{HTF_{flüssig}} * T_{Meeting}$$

$$(C_{PCM_{flüssig}} + C_{HTF_{flüssig}}) * T_{Meeting} = C_{HTF_{flüssig}} * T_{HTF_{Start}} + C_{PCM_{flüssig}} * T_{Liquid} - Q_{PCM_{Phasenübergang}} - C_{PCM_{fest}} * (T_{Solid} - T_{PCM_{Start}})$$

$$T_{Meeting} = \frac{C_{HTF_{flüssig}} * T_{HTF_{Start}} + C_{PCM_{flüssig}} * T_{Liquid} - Q_{PCM_{Phasenübergang}} - C_{PCM_{fest}} * (T_{Solid} - T_{PCM_{Start}})}{C_{PCM_{flüssig}} + C_{HTF_{flüssig}}} \quad [55]$$

In diesem Vergleich wird mit folgenden Werten gerechnet.

$$T_{Meeting} = \frac{184 \frac{kJ}{K} * 60 °C + 90 \frac{kJ}{K} * 18 °C - 4621 kJ - 45.3 \frac{kJ}{K} * (16 °C - 5 °C)}{(90 \frac{kJ}{K} + 184 \frac{kJ}{K})} = 27.46 °C$$

Somit treffen sich die Temperatur des HTFs und des PCMs bei 27.46 °C. In Abbildung 25 werden die Temperaturverläufe von PCM und HTF bei der Unterscheidung von drei Fällen bei unterschiedlichen, zeitlichen Auflösungen dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass je grösser die zeitliche Auflösung ist, desto höher wird die gemeinsame Temperatur.

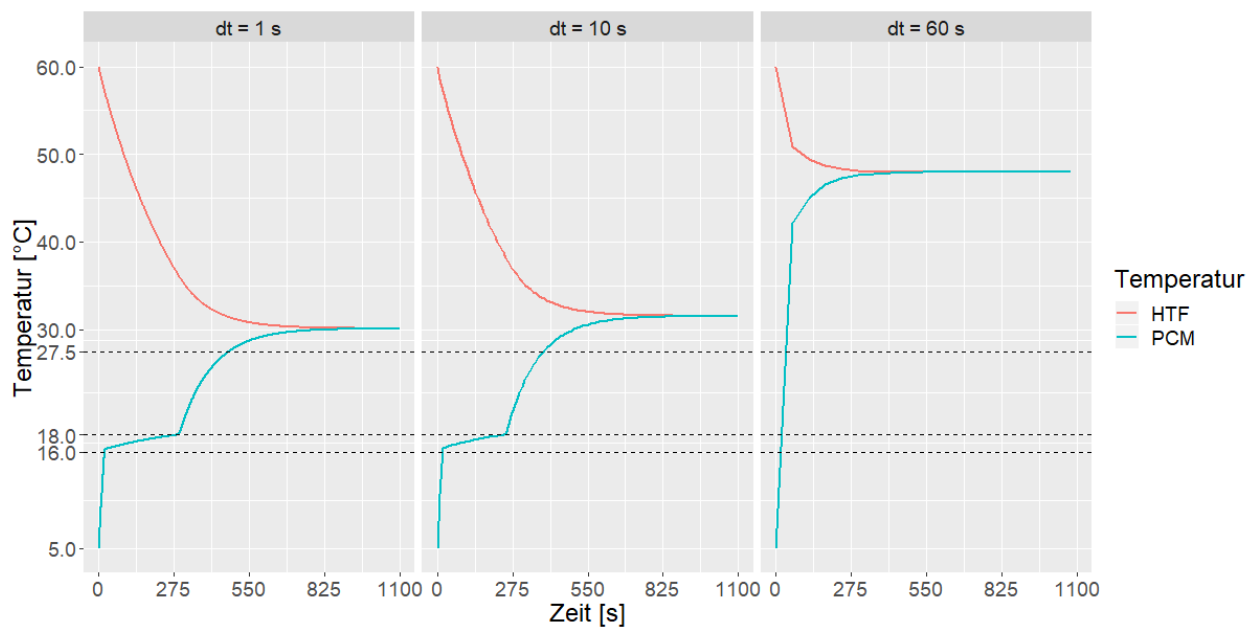


Abbildung 25: Temperaturverlauf von 5 °C warmem PCM in 60 °C warmem HTF, bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei einer Unterscheidung von drei Fällen.

Bei der Unterscheidung von drei Fällen wird in jedem Zeitabschnitt mit dem Fall der Starttemperatur gerechnet. Dadurch wird bei einer zeitlichen Auflösung von 60 s der komplette Phasenübergang übersprungen. Im Zeitschritt vor dem Phasenübergang liegt die Temperatur unter der Solidus-Temperatur, dadurch wird die Temperaturänderung in den nächsten 60 s wie im festen Zustand berechnet. Durch die Vernachlässigung des Phasenübergangs wird eine sehr grosse Wärmemenge nicht berücksichtigt, wodurch falsche Temperaturen berechnet werden. In Abbildung 26 wird der Temperaturverlauf unter der Berücksichtigung von sieben Fällen dargestellt.

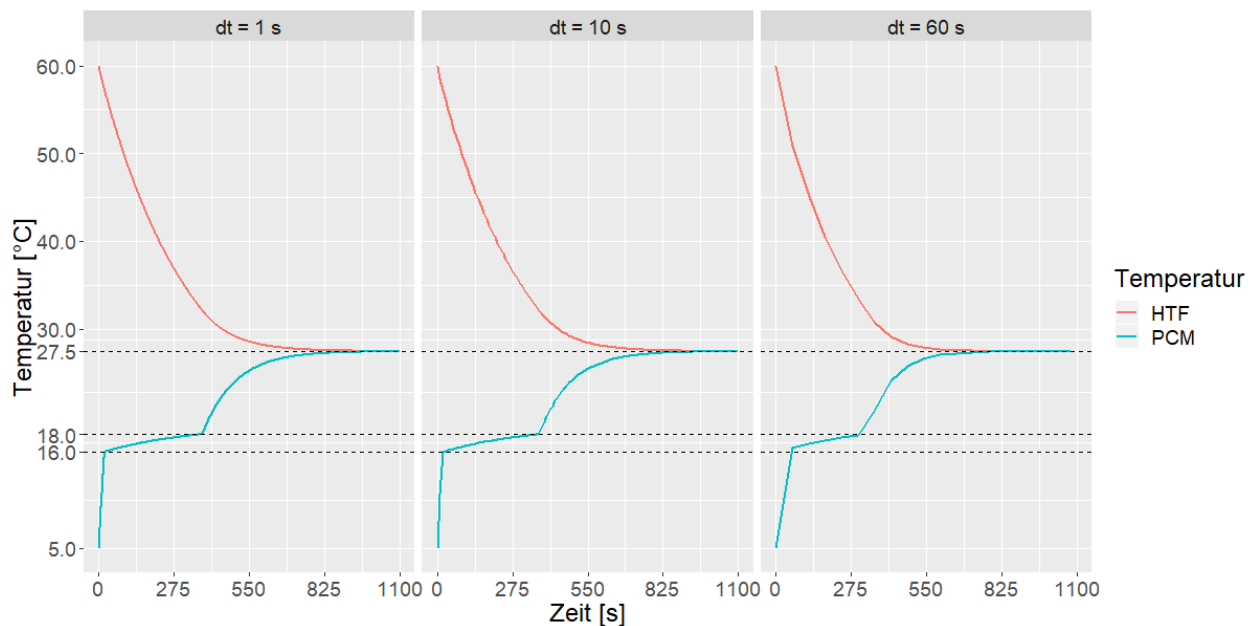


Abbildung 26: Temperaturverlauf von 5 °C warmem PCM in 60 °C warmem HTF, bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei einer Unterscheidung von sieben Fällen.

Bei jeder zeitlichen Auflösung treffen sich die Temperaturen vom PCM und HTF bei einer Temperatur von ca. 27.46 °C. Das Verhalten bei sieben Fällen zeigt sich im rot markierten Bereich

in der Abbildung 27. Bei einer zeitlichen Auflösung von 1 s ist die Steigung bis zur Solidus-Linie steiler als bei einer zeitlichen Auflösung von 60 s, weil bei 1 s bis zur Solidus-Linie im festen Zustand gerechnet wird. Bei 60 s durchdringt die Temperatur bei der Berechnung im festen Zustand die Solidus-Linie, daher wird mit dem Fall „fest zu Phasenübergang“ gerechnet. Da der Anteil des Phasenübergangs schon miteinbezogen wird, liegen die Kurven von 1 s und 60 s im Phasenübergang auf der gleichen Höhe.

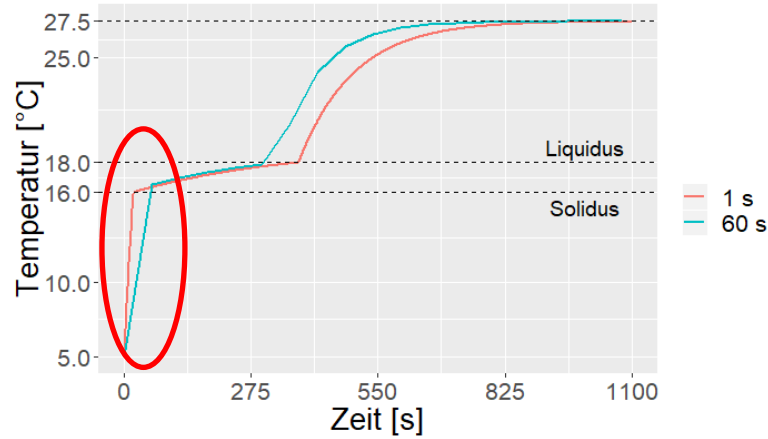


Abbildung 27: Vergleich zeitliche Auflösung zwischen 1 s und 60 s bei sieben Fällen.

Es wird überprüft, ob die Fallunterscheidungen auch bei der Abkühlung richtig implementiert wurden. Dazu wird $T_{Meeting}$ berechnet, wenn $T_{PCM_{start}} > T_{HTF_{start}}$ ist.

$$Q_{PCM_{flüssig}} + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + Q_{PCM_{fest}} = Q_{HTF_{flüssig}}$$

$$C_{PCM_{flüssig}} * (T_{PCM_{start}} - T_{Liquid}) + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + C_{PCM_{fest}} * (T_{Solid} - T_{Meeting}) = C_{HTF_{flüssig}} * (T_{Meeting} - T_{HTF_{start}})$$

$$\begin{aligned} C_{PCM_{flüssig}} * (T_{PCM_{start}} - T_{Liquid}) + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + C_{PCM_{fest}} * T_{Solid} - C_{PCM_{fest}} * T_{Meeting} \\ = C_{HTF_{flüssig}} * T_{Meeting} - C_{HTF_{flüssig}} * T_{HTF_{start}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{PCM_{flüssig}} * (T_{PCM_{start}} - T_{Liquid}) + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + C_{PCM_{fest}} * T_{Solid} + C_{HTF_{flüssig}} * T_{HTF_{start}} \\ = (C_{PCM_{fest}} + C_{HTF_{flüssig}}) * T_{Meeting} \end{aligned}$$

$$T_{Meeting} = \frac{C_{PCM_{flüssig}} * (T_{PCM_{start}} - T_{Liquid}) + Q_{PCM_{Phasenübergang}} + C_{PCM_{fest}} * T_{Solid} + C_{HTF_{flüssig}} * T_{HTF_{start}}}{(C_{PCM_{fest}} + C_{HTF_{flüssig}})} \quad [56]$$

Dabei werden folgende Werte eingesetzt.

$$T_{Meeting} = \frac{90 \frac{kJ}{K} * (60^\circ C - 50^\circ C) + 4621 kJ + 45.3 \frac{kJ}{K} * 48^\circ C - 184 \frac{kJ}{K} * 5^\circ C}{(45.3 \frac{kJ}{K} - 184 \frac{kJ}{K})} = 37.64^\circ C$$

Abbildung 28 bestätigt, dass auch die Temperaturabnahme von PCM richtig implementiert wurde.

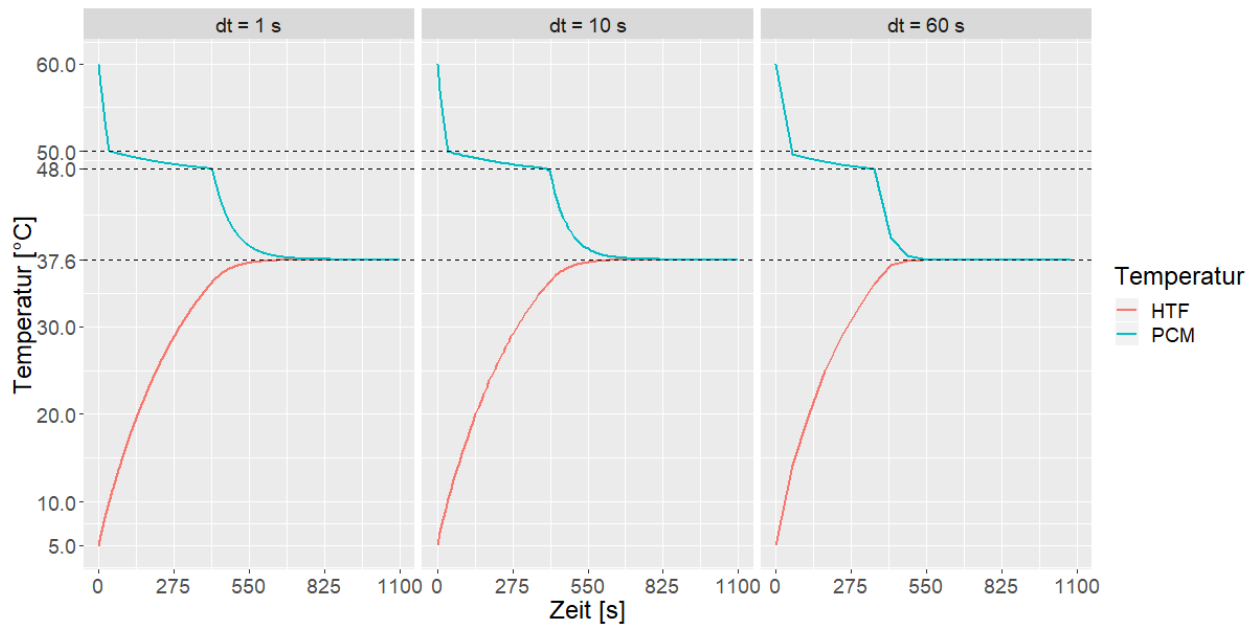


Abbildung 28: Temperaturverlauf von 60 °C warmem PCM in 5 °C warmem HTF, bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei einer Unterscheidung von sieben Fällen.

3.3.4 Wärmeaustausch durch die Wand

Der Speicher ist von einer gleichbleibenden Raumtemperatur T_{Raum} umgeben (siehe Abbildung 29). Bei dieser Betrachtung findet der einzige Wärmeaustausch zwischen Speicher und der Umgebung statt.

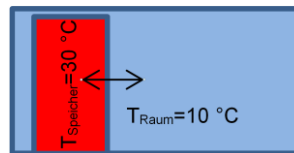


Abbildung 29: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches durch die Wand.

Der Temperatureaustausch erfolgt über die Mantelfläche des Speichers A_{Mantel} . Der von dem Speicher abgegebene Wärmestrom ist die zeitliche Änderung der Enthalpie des Speichers.

$$\dot{Q}_{\text{Wärmeleitung}} = -C * \frac{\partial T_{\text{Speicher}}}{\partial t} \quad [57]$$

Die Wärmeübergangszahl, die Wärmeaustauschfläche und die Temperaturdifferenz zwischen dem Speicher und dem Raum bestimmen den Wärmestrom.

$$\dot{Q}_{\text{Wärmeleitung}} = \frac{\lambda_{\text{Wand}}}{d_{\text{Wand}}} * A * (T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}}) \quad [58]$$

Beim Gleichsetzen von Gl. [57] und Gl. [58] ergibt sich folgende Differentialgleichung:

$$\frac{\partial T_{\text{Speicher}}}{\partial t} = - \frac{\frac{\lambda_{\text{Wand}}}{d_{\text{Wand}}} * A}{C} (T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}}) \quad [59]$$

Die Temperatur T_{Speicher} wird durch die Temperaturdifferenz $T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}}$ substituiert, dadurch ergibt sich nach der Separation der Variablen:

$$\frac{\partial (T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}})}{(T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}})} = - \frac{\frac{\lambda_{\text{Wand}}}{d_{\text{Wand}}} * A_{\text{Mantel}}}{C} * \partial t \quad [60]$$

Alles ausser der Temperatur ist konstant. Daher kann Gl. [60] integriert und nach T_{Speicher} aufgelöst werden.

$$T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}} = (T_{A_{\text{Speicher}}} - T_{\text{Raum}}) * e^{-\frac{\lambda_{\text{Wand}}}{d_{\text{Wand}}} * A * \frac{1}{C} * t}$$

$$T_{\text{Speicher}} = (T_{A_{\text{Speicher}}} - T_{\text{Raum}}) * e^{-\frac{\lambda_{\text{Wand}}}{d_{\text{Wand}}} * A * \frac{1}{C} * t} + T_{\text{Raum}} \quad [61]$$

Zur Plausibilisierung wird der folgende Fall simuliert:

$$T_{\text{Speicher}} = (30 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) * e^{-\frac{1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}{0.1 \text{ m}} * 5 \text{ m}^2 * \frac{1}{800 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}}} * t + 10 \text{ °C}$$

Zur Überprüfung wird diese Funktion mit den simulierten Temperaturverläufen geplottet (siehe Abbildung 30 rechts).

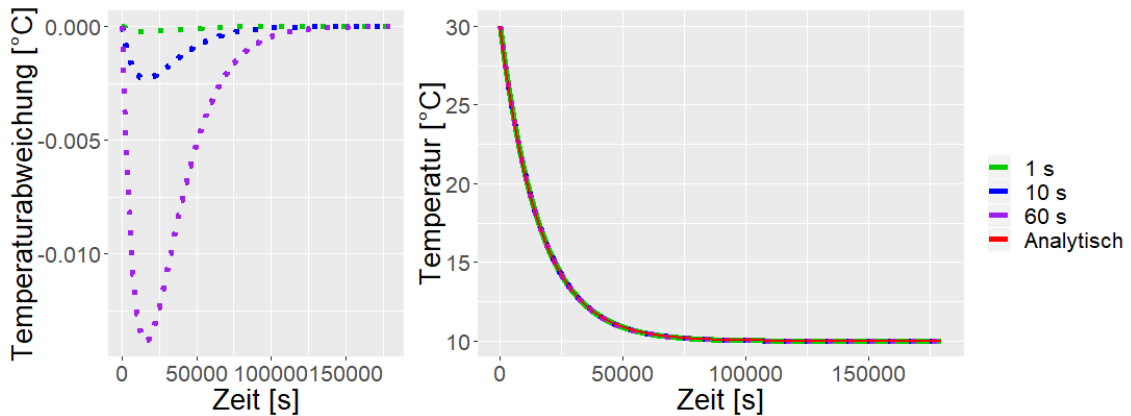


Abbildung 30: Temperaturabweichung von simulierten Werten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperaturänderung im Speicher, wenn nur der Temporaustausch über die Mantelfläche des Speichers mit der Umgebungstemperatur berücksichtigt wird (rechts).

Die Temperaturabweichungen (siehe Abbildung 30 links) sind kleiner als bei Abbildung 19 links, da aufgrund der kleineren Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Umgebungstemperatur und dem kleineren Wärmeübergang die Temperaturänderungen pro Zeitschritt kleiner sind.

3.3.5 Wärmeaustausch durch Massenstrom

Dem Speicher wird bei konstantem Massenstrom mit konstanter Temperatur HTF zugeführt. Dabei fließt gleich viel HTF in den Speicher, wie auch aus dem Speicher fließt (siehe Abbildung 31).

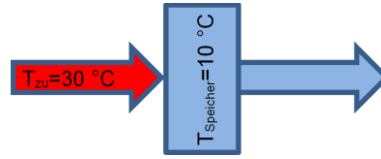


Abbildung 31: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches durch den Massenstrom.

Der Zufluss zum Speicher ist der einzige stattfindende Wärmeaustausch. Der Temperaturexaustausch erfolgt über den Massenstrom \dot{m}_{HTF} . Der Wärmestrom, der in den Speicher hineinfließt, ist die zeitliche Änderung der Enthalpie des Speichers.

$$\dot{Q}_{Massenstrom} = -C * \frac{\partial T_{Speicher}}{\partial t} \quad [62]$$

Der Massenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen dem zufließenden HTF und dem Speicher bestimmen den Wärmestrom.

$$\dot{Q}_{Massenstrom} = \dot{m}_{HTF} * c_{p HTF} * (T_{zu} - T_{Speicher}) \quad [63]$$

Beim Gleichsetzen von Gl. [62] und Gl. [63] ergibt sich folgende Differentialgleichung:

$$\frac{\partial T_{Speicher}}{\partial t} = -\frac{\dot{m}_{HTF} * c_{p HTF}}{C} * (T_{zu} - T_{Speicher}) \quad [64]$$

Die Temperatur $T_{Speicher}$ wird durch die Temperaturdifferenz $T_{zu} - T_{Speicher}$ substituiert, dadurch ergibt sich nach der Separation der Variablen:

$$\frac{\partial (T_{zu} - T_{Speicher})}{(T_{zu} - T_{Speicher})} = -\frac{\dot{m}_{HTF} * c_{p HTF}}{C} * \partial t \quad [65]$$

Alles ausser der Temperatur ist konstant. Daher kann Gl. [65] integriert und nach $T_{Speicher}$ aufgelöst werden.

$$T_{zu} - T_{Speicher} = (T_{zu} - T_{Speicher}) * e^{-\frac{\dot{m}_{HTF} * c_{p HTF}}{C} * t}$$

$$T_{Speicher} = -(T_{zu} - T_{Speicher}) * e^{-\frac{\dot{m}_{HTF} * c_{p HTF}}{C} * t} + T_{zu} \quad [66]$$

Zur Plausibilisierung wird der folgende Fall simuliert:

$$T_{Speicher} = -(40 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) * e^{-\frac{0.05 \frac{kg}{s} * 4.185 \frac{kJ}{kg * K}}{800 \frac{kJ}{K}} * t} + 40 \text{ °C}$$

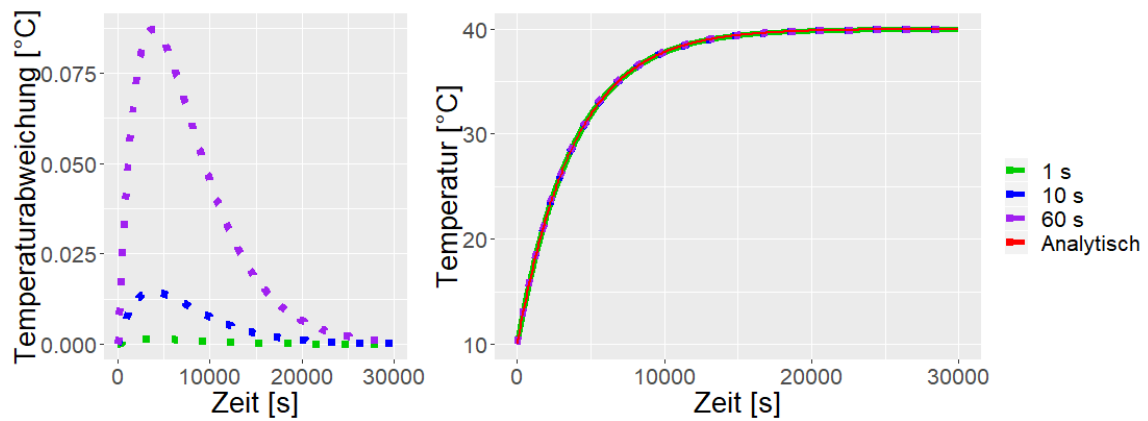


Abbildung 32: Temperaturabweichung von simulierten Werten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperatur im Speicher, wenn dem 10 °C kalten Speicher 40 °C warmes HTF mit einem Massenstrom von 0.05 kg/s zugeführt wird (rechts).

Abbildung 32 bestätigt, dass der Temperaturverlauf richtig implementiert wurde.

Mehrere Anschlüsse

Beim Einsatz in einem Wärmepumpensystem wie dem L-Sol kann die Wärmepumpe zu jeder Zeit Wärme aus dem PCM-Speicher entziehen und die PVT-Module können zu jeder Zeit Wärme in den Speicher einbringen. Daher sind im PCM-Speicher zwei Zuflüsse und zwei Abflüsse angebracht. Die Zu- und Abflüsse sind variabel, damit der Zufluss von unterschiedlicher Anordnung geprüft werden kann. Des Weiteren werden der PVT-Kreislauf und der WP-Kreislauf mit verschiedenen Massenströmen betrachtet. Bei der Betrachtung fließt das HTF immer von der Zufuhr zur Abfuhr des jeweiligen Kreislaufes.

Getrennte Ströme

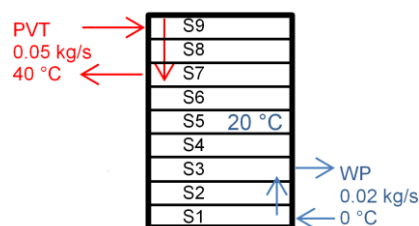


Abbildung 33: Strömungsverlauf, PVT-Kreislauf fließt von S9 bis S7, WP-Kreislauf von Schicht S1 bis S3.

In Abbildung 33 wird der zu prüfende Strömungsverlauf dargestellt. In Abbildung 34 wird ersichtlich, dass das 40 °C warme Wasser zuerst die neunte, dann die achte und zum Schluss die siebte Schicht erwärmt. Das 0 °C kalte Wasser fließt von der ersten zur dritten Schicht. Weil nur die Massenströme und sonst keine Einflüsse berücksichtigt werden, bleiben die Temperaturen in den Schichten vier bis sechs konstant bei 20 °C.

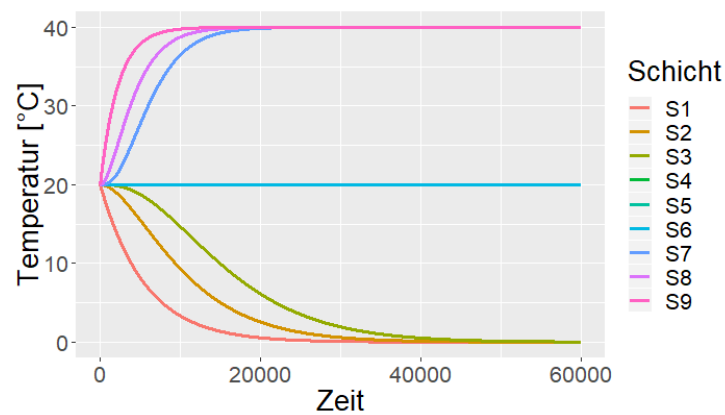


Abbildung 34: Verlauf der Schichttemperaturen, wenn nur die Temperaturänderung aufgrund der Strömung berücksichtigt wird. Es fließt 40 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.05 kg/s von S9 nach S7. Dazu fließt 0 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.02 kg/s von S1 nach S3.

Zur besseren Verständlichkeit werden in Abbildung 35 die Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten dargestellt. Dabei werden über die Temperaturabstufungen die Strömungsverläufe ersichtlich.

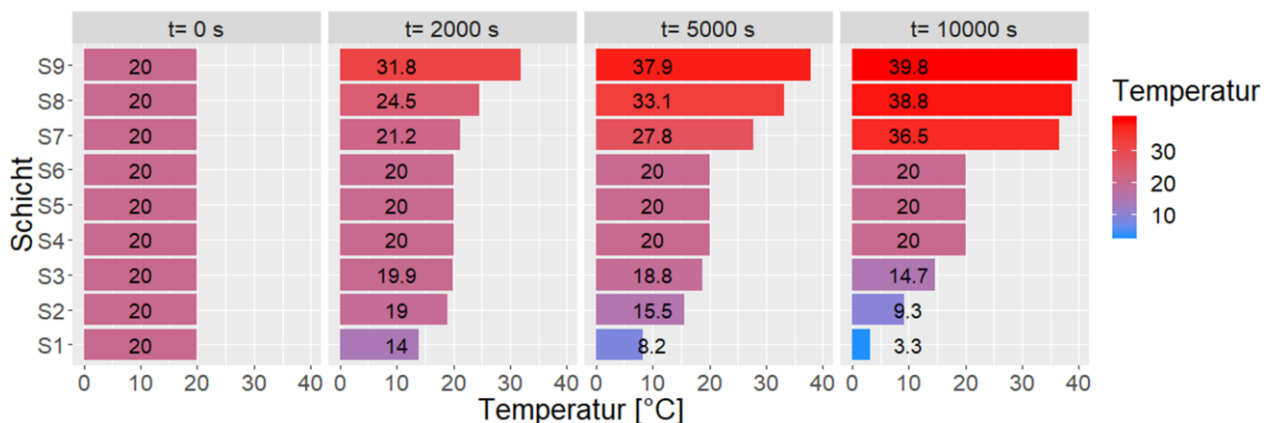


Abbildung 35: Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten bei getrennten Strömen.

Teilweise vermischte Strömung

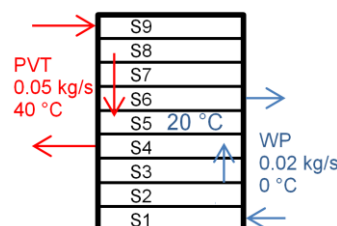


Abbildung 36: Strömungsverlauf, PVT-Kreislauf fließt von S9 zu S4, WP-Kreislauf von Schicht S1 bis S6.

In Abbildung 36 ergibt sich im Strömungsverlauf eine Vermischung der Kreisläufe in den Schichten S4 bis S6. Diese Vermischung ist in Abbildung 37 ersichtlich. Aufgrund des höheren Massenstroms von dem PVT-Kreislauf liegen die Temperaturen in den Schichten S4 bis S6 näher bei der Temperatur des PVT-Kreislaufes.

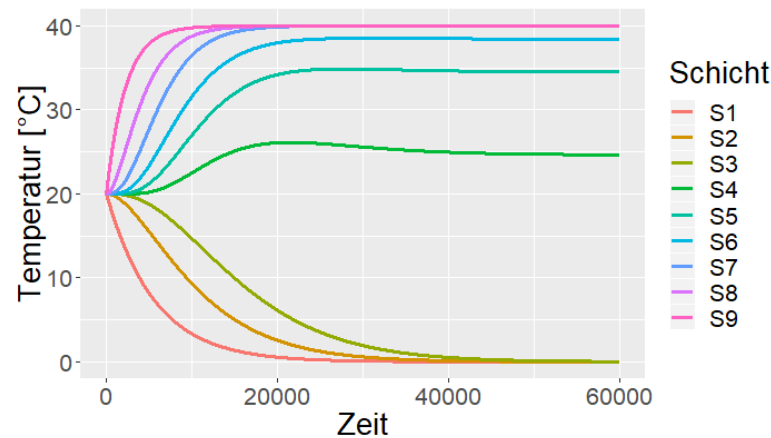


Abbildung 37: Verlauf der Schichttemperaturen, wenn nur die Temperaturänderung aufgrund der Strömung berücksichtigt wird. Es fließt 40 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.05 kg/s von S9 nach S4. Dazu fließt 0 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.02 kg/s von S1 nach S6.

Zur besseren Verständlichkeit werden in Abbildung 38 die Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten dargestellt. Dabei werden über die Temperaturabstufungen die Strömungsverläufe ersichtlich.

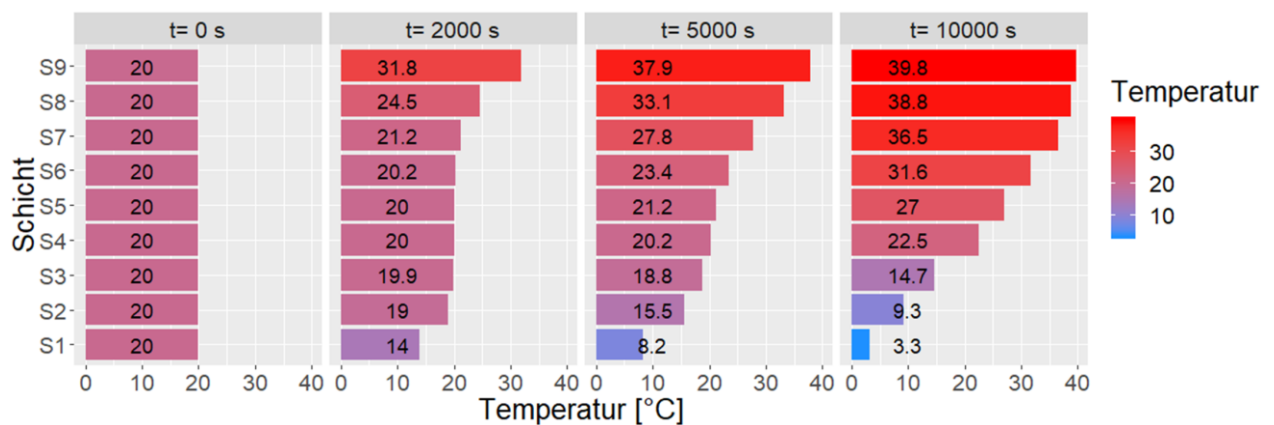


Abbildung 38: Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten bei teilweise vermischten Strömen.

3.4 Standardsimulation

Das Speicherverhalten von PCM-Speichern ist stark vom Einsatzgebiet abhängig. Daher muss der Speicher vor der Auswertung der einzelnen Parameter, abhängig von den Massenströmen und der Ladezeit, grob dimensioniert werden. Die Vorteile der höheren Wärmekapazität eines PCM-Speichers können nur unter den folgenden Voraussetzungen genutzt werden:

- Geringes Verhältnis zwischen Speichervolumen und Massenstrom, so dass ein sensibler Speicher schon nach kurzer Zeit geladen ist und ein PCM-Speicher aufgrund der höheren Wärmekapazität länger geladen werden kann.
- Verwendung eines kleinen Temperaturbereichs. Je kleiner der Temperaturbereich im Speicher, desto mehr Wärme kann in einem PCM-Speicher im Verhältnis zu einem sensiblen Speicher gespeichert werden, solange der Phasenübergang genutzt wird.

Simulationsablauf

Bei der Standardsimulation wird der Speicher bei einer Temperatur von 20 °C für 8 h mit einem Massenstrom von 0.03 kg/s geladen. Anschliessend wird der Speicher durch die Wärmepumpe mit einem Massenstrom von 0.5 kg/s bei einer Temperatur von 0 °C entladen. In Abbildung 39 ist die Standardsimulation als Schema dargestellt. Der Speicher wird in neun Schichten unterteilt, beim Erwärmen fliesst das HTF von der fünften in die erste Schicht, beim Abkühlen von der Ersten bis zur Neunten. Durch die Zufuhr des PVT-Kreislaufs in der Mitte bei S5 und den nach S1 gerichteten Massenstrom kann sich die Wärme durch die freie Konvektion nach oben und durch den Massenstrom nach unten ausbreiten. Dadurch kann der Speicher schneller geladen werden als wenn sich die Wärme nur in eine Richtung ausbreitet. Der Ausfluss vom PVT-Kreislauf findet in S1 statt, weil da die Temperaturen am tiefsten sind, wodurch im PVT-Modul am meisten Wärme gewonnen werden kann. Der WP-Kreislauf fliesst von der untersten zur obersten Schicht, damit die gesamte Wärme aus dem Speicher entnommen werden kann. Die Auswertung erfolgt über die Temperatur und Menge des aus der neunten Schicht ausfliessenden HTFs, weil diese Wärmemenge von der Wärmepumpe verwendet wird.

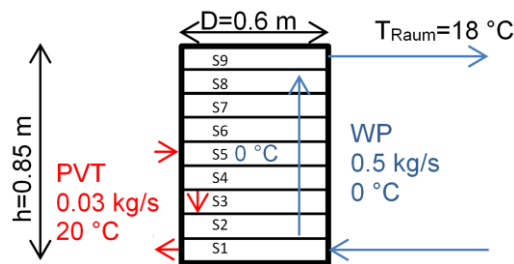


Abbildung 39: Schema der Standardsimulation

PCM-Parameter

Die zu untersuchenden Parameterbereiche wurden aus dem Kapitel 2.1.3 verwendet. Beim HTF wurden die Stoffeigenschaften von Wasser aus Tabelle 1 verwendet. Die spezifische Wärmekapazität vom PCM ist bei PCM-Speicher von geringer Bedeutung, daher wurde deren Einfluss auf das Speicherverhalten nicht untersucht. Für die Simulationen wurden die folgenden Standardparameter verwendet.

$$\begin{aligned}
 c_{p_{PCM_{fest}}} &= 2 \frac{kJ}{kg \cdot K} & c_{p_{PCM_{flüssig}}} &= 2.5 \frac{kJ}{kg \cdot K} & c_{p_{PCM_{Schmelzwärme}}} &= 200 \frac{kJ}{kg \cdot K} \\
 \rho_{PCM} &= 800 \frac{kg}{m^3} & \lambda_{PCM} &= 0.1 \frac{W}{m \cdot K} & R_{PCM} &= 0.02 m & \eta_{Füllmenge} &= 0.5 \\
 c_{p_{HTF}} &= 4.185 \frac{kJ}{kg \cdot K} & \rho_{HTF} &= 1'000 \frac{kg}{m^3} & \lambda_{HTF} &= 0.5562 \frac{W}{m \cdot K}
 \end{aligned}$$

Massenströme

Der Massenstrom des PVT-Kreislaufs wurde auf 0.03 kg/s (ca. 100 l/h) festgelegt, was einem typischen Massenstrom durch PVT-Module entspricht. Der Massenstrom durch die PVT-Module ist

so gering, damit das HTF genügend Ladezeit hat. Bei höheren Massenströmen sind in der Regel die Rücklauftemperaturen kleiner. Durch das Parallelschalten der HTF-Leitungen von mehreren PVT-Modulen kann der Massenstrom erhöht werden.

Der Massenstrom der Wärmepumpe wurde auf 0.5 kg/s (ca. 2000 l/h) festgelegt, was einem typischen Massenstrom einer Wärmepumpe entspricht. Für den betrachteten Speicher ist dieser Massenstrom hoch, wodurch der Entladeprozess in kurzer Zeit abläuft. Generell begünstigen hohe Massenströme die Entladeleistung des PCM-Speichers.

Lade- und Entladetemperatur

In dieser Arbeit wird die Rücklauftemperatur des PVT-Moduls in den PCM-Speicher als Ladetemperatur und die Rücklauftemperatur der Wärmepumpe in den PCM-Speicher als Entladetemperatur definiert.

Die Ladetemperatur wird bei der Standardsimulation auf 20 °C festgelegt, da sich diese Temperatur für einen kalten Speicher eignet.

Die Entladetemperatur der Standardsimulation wird auf 0 °C festgelegt, damit die Quelltemperaturen der Wärmepumpe über den Quelltemperaturen von der Aussenluft und vom Eisspeicher liegen.

Schmelzbereich

Wenn der Schmelzbereich näher bei der Entladetemperatur liegt, wird der PCM-Speicher schneller geladen, dafür aber langsamer entladen und umgekehrt. Das Laden wird als wichtiger erachtet, weil maximal die gleiche Wärmemenge, die geladen wird, entladen werden kann und weil der Massenstrom beim Entladen grösser ist als beim Laden. Für die Standardsimulationen wird der Schmelzbereich von 4 bis 6 °C gewählt.

Zeitschritte

Im Modell werden die Temperaturänderungen schrittweise berechnet. Aus der Plausibilisierung wird ersichtlich, dass grössere Zeitschritte zu grösseren Fehlern führen, weil über eine längere Zeit mit konstanten Werten gerechnet wird. Bei grösseren Zeitschritten wird die Anzahl Rechenschritte reduziert, wodurch die Rechenzeit kürzer wird. Je kleiner die Zeitschritte, desto genauer das Resultat und desto länger die Rechenzeit. In der Standardsimulation wird mit einem Zeitschritt von 10 s für eine Zeitspanne von 13 h gerechnet. Der Speicher wird 8 h geladen und anschliessend 5 h entladen.

Speicherdimensionierung

Der Speicher wurde experimentell dimensioniert, damit ein sensibler Speicher aufgrund des Massenstromes, der Ladetemperatur und der Ladezeit beinahe komplett geladen werden kann.

Daraus ergab sich ein Speicher mit einer Höhe von 0.85 m und einem Radius von 0.3 m, was einem Speichervolumen von 240 l entspricht.

$$240 \text{ kg} * 4.185 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 20.12 \text{ MJ}$$

Der Speicher wird mit einer 0.1 m dicken Isolation mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.01 W/(m*K) simuliert.

3.5 Untersuchung des Speicherverhaltens

Es werden das allgemeine Speicherverhalten, die Wärmeanteile und das Lade- und Entladeverhalten beschrieben. Beim allgemeinen Speicherverhalten werden die Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Schichten sowie zwischen dem HTF und dem PCM ersichtlich. Über die Wärmeanteile wird aufgezeigt welche Einflüsse das Speicherverhalten prägen. Das Lade- und Entladeverhalten beschreibt wie die Verläufe von Temperatur, kumulierter Wärme und Leistung beeinflusst werden.

3.5.1 Speicherverhalten

In Abbildung 40 sind die Temperaturverläufe der einzelnen Schichten von HTF und PCM dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Temperatur in S5 am schnellsten ansteigt. Dies ist auf die Zufuhr des warmen HTFs zurückzuführen. Zwischen den rot gestrichelten Linien befindet sich das PCM von S5 im Phasenübergang. Zu Beginn des Phasenübergangs in S5 flacht die Temperatur des HTFs ab, weil die Temperatur des PCMs im Phasenübergang aufgrund der hohen Schmelzwärme weniger schnell ansteigt. Durch den geringen Temperaturanstieg in S5 fließt wenig Wärme zu den restlichen Schichten, wodurch bei diesen der Temperaturanstieg verkleinert wird. Nachdem das PCM in S5 komplett geschmolzen ist, steigen die Temperaturen in allen Schichten schneller an. Aus «Temperaturverlauf PCM» in Abbildung 40 wird ersichtlich, wann und in welcher Schicht ein Phasenübergang abgeschlossen ist. Nach jedem Phasenübergang steigen die Temperaturen in Richtung des Massenstromes oder der freien Konvektion schneller an. Der abgeschlossene Phasenübergang von S4 beeinflusst direkt S3, der abgeschlossene Phasenübergang von S3 beeinflusst S4 nicht, weil das HTF von S4 nach S3 fließt.

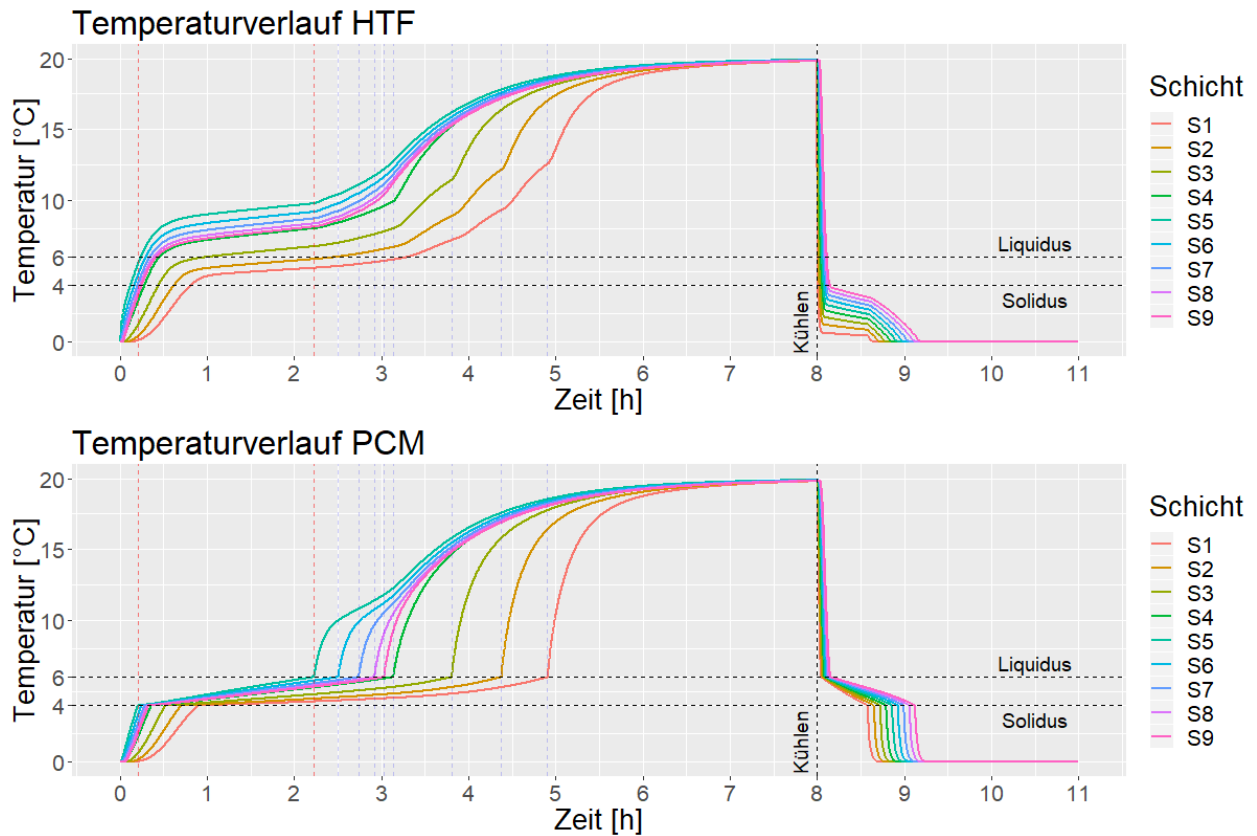


Abbildung 40: Temperaturverläufe der einzelnen Schichten von HTF und PCM. Die vertikal gestrichelten Linien in rot stellen den Phasenübergang von S5 dar. Die vertikal gestrichelten Linien in blau stellen den Wechsel vom Phasenübergang zum flüssigen Zustand dar.

Zum besseren Verständnis werden in Abbildung 41 die Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten dargestellt. Die Temperaturen in den Schichten über S5 steigen schneller an als unter S5. Dies bedeutet es wird mehr Wärme durch freie Konvektion als durch den Massenstrom transportiert. Bei der freien Konvektion wird derselbe Wärmeübergangskoeffizient zwischen HTF und PCM wie beim vorhandenen Massenstrom verwendet. Im Vergleich zwischen HTF und PCM ist zu sehen, dass beim Erwärmen die PCM-Temperaturen unter und beim Kühlen über den HTF-Temperaturen liegen.

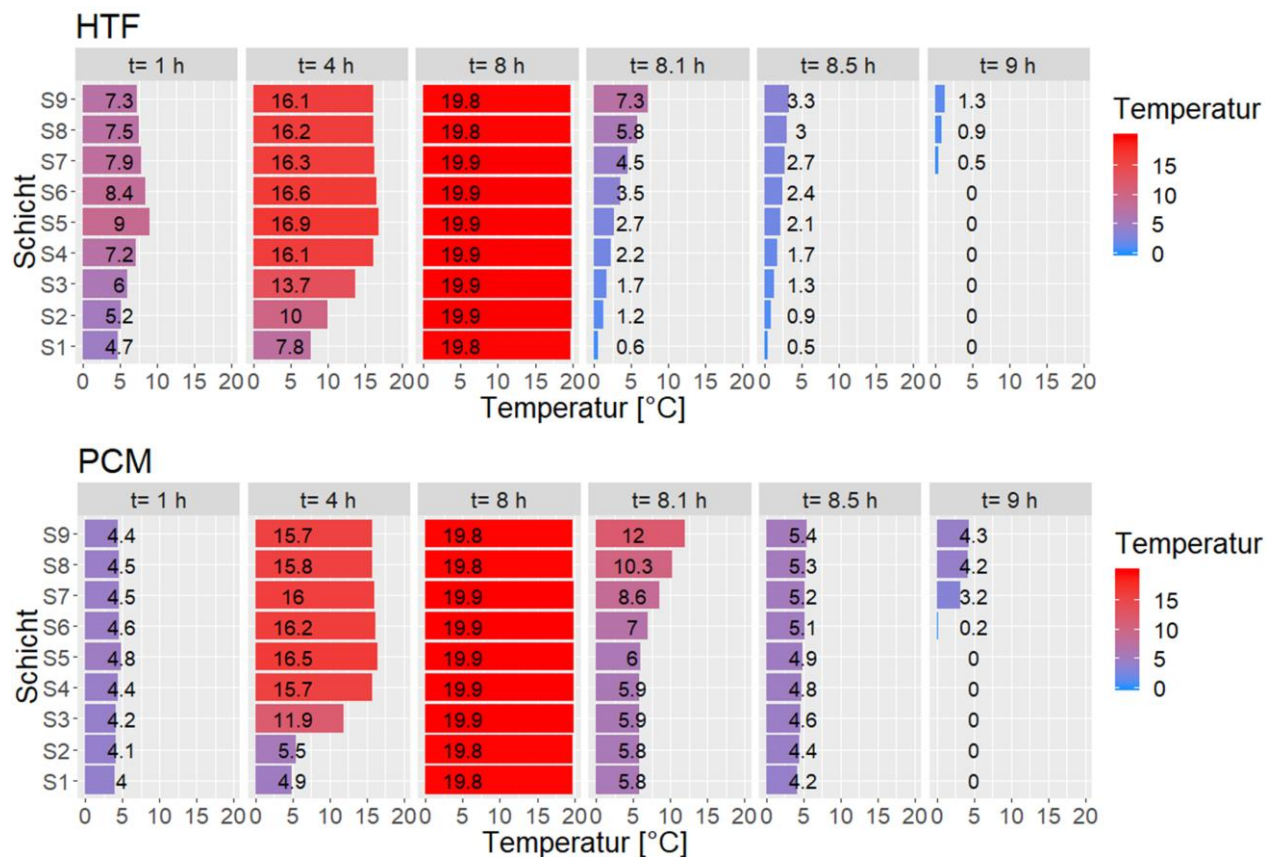


Abbildung 41: Temperaturen der einzelnen Schichten zu den angegebenen Zeiten.

3.5.2 Wärmeanteile

Abbildung 42 und Abbildung 43 veranschaulichen wie viel Wärme durch die einzelnen Wärmeanteile beim Erwärmen und beim Kühlen transportiert wird, indem alle Wärmeänderungen schichtweise (≤ 8 h und > 8 h) aufsummiert werden.

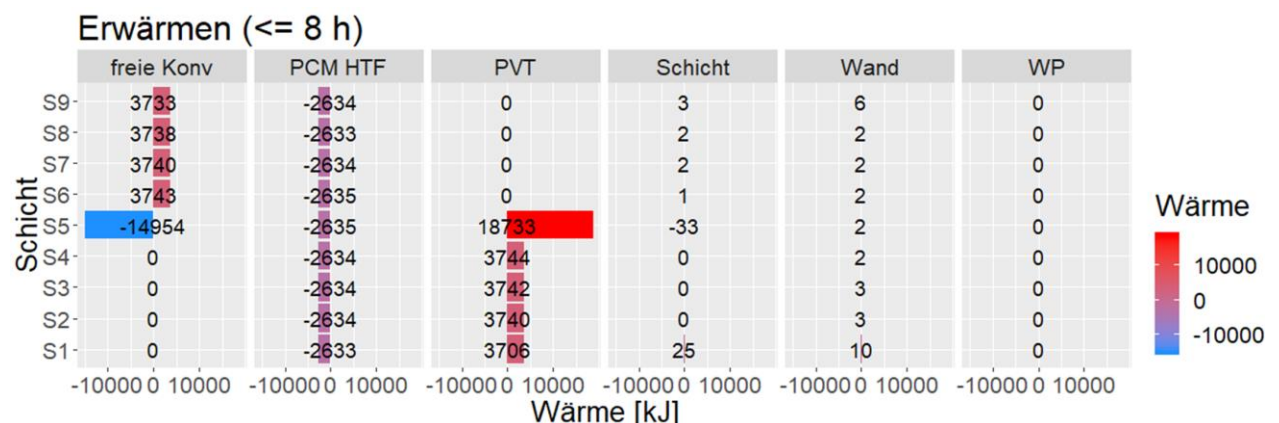


Abbildung 42: Wärmeeinflüsse der einzelnen Wärmeänderungsanteile während dem Erwärmen.

Beim Erwärmen (Abbildung 42) fließt die Wärme vom PVT-Kreislauf in S5 ein. In S5 wird insgesamt eine Wärmemenge von 33.7 MJ (Summe aus allen Schichten in «PVT») zugeführt. Diese Wärmemenge verteilt sich durch den Massenstrom nach S1, durch die freie Konvektion nach S9 und zum PCM. Im HTF in S5 bleibt nur noch eine Wärmemenge von 1.1 MJ zurück, wodurch das HTF in S5 auf 19.9 °C erwärmt wird. Zum PCM fließen in S5 insgesamt 2.6 MJ

«PCM HTF», wodurch das PCM auch auf 19.9 °C erwärmt wird. Durch die höhere Wärmekapazität vom PCM benötigt das PCM mehr Wärme zur gleichen Temperaturerhöhung als das HTF. Die Wärmepumpe ist während dem Erwärmen ausgeschaltet, daher ergeben sich bei «WP» keine Wärmeänderungen. Die Wärmeänderungen durch die Schicht und die Wand sind vernachlässigbar klein. Die Raumtemperatur liegt hauptsächlich über der Speichertemperatur, daher fließt Wärme durch die Wand zum PCM-Speicher. Bei der Wand wird bei S9 und S1 am meisten Wärme zugefügt, da dort die Übertragungsflächen am grössten sind.

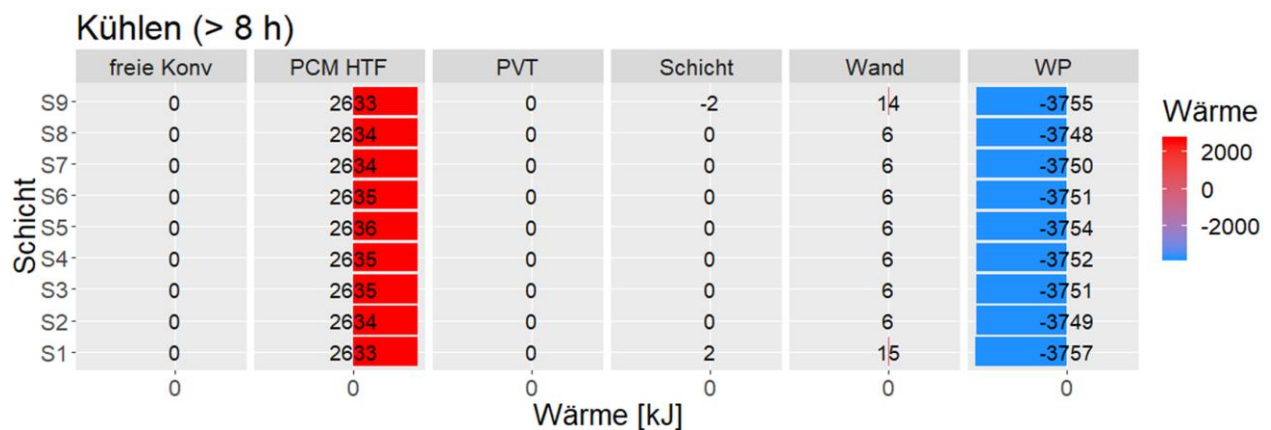


Abbildung 43: Wärmeeinflüsse der einzelnen Wärmeanteile während dem Kühlen.

Beim Kühlen (Abbildung 43) ist die einzige Wärmequelle für das HTF die im PCM gespeicherte Wärme. Da der Speicher von unten nach oben gekühlt wird, entsteht keine freie Konvektion. Der Einfluss der Wärmeleitung durch die Schicht wird weiter gesenkt, weil der Durchfluss der Wärmepumpe und die Temperaturänderung so gross sind. Beim Kühlen fließt mehr Wärme durch die Wand als beim Erwärmen, weil die Temperaturen im Speicher über eine längere Zeit 0 °C betragen.

Das PCM gibt mehr Wärme ab, als es aufnimmt. Dieser Fehler ist auf den hohen Massenstrom beim Kühlen zurückzuführen. Der Fehler wird als vernachlässigbar erachtet, er könnte aber durch einen kleineren Zeitschritt verkleinert werden.

3.5.3 Lade- und Entladeverhalten

Die Durchschnittstemperatur vor dem Kühlen liegt bei der Standardsimulation im sensiblen Speicher bei 19.92 °C und im PCM-Speicher bei 19.86 °C. Dadurch wird bei der Wärmeentnahme aus dem sensiblen Speicher nur 19.67 MJ statt 20.12 MJ entnommen und beim PCM-Speicher werden 33.35 MJ Wärme statt 33.80 MJ entnommen. Das Entladeverhalten ist vom Ladeverhalten abhängig, da bei allen Parametern eine unterschiedliche Temperatur am Ende des Ladevorganges erreicht wird. Für das Speicherverhalten ist der gesamte Lade- und Entladevorgang interessant. Dadurch wird ersichtlich, bei welchen Parametern der Speicher nicht auf 20 °C geladen werden kann und wie sich dies auf die entnommene Wärme auswirkt.

Das Ladeverhalten wird über die Temperatur analysiert. Die Auswertung des Entladeverhalten erfolgt über die Wärme und die Leistung. In den Abbildungen werden jeweils die Verläufe aus der neunten Schicht dargestellt, weil das HTF aus der neunten Schicht aus dem Speicher herausfließt.

Ladeverhalten

Im sensiblen Speicher nähert sich die Temperatur asymptotisch der Ladetemperatur.

Der Temperaturanstieg im PCM-Speicher wird, wie in Abbildung 44 dargestellt, in die drei Phasen des PCM's aufgeteilt. Die HTF-Temperatur verläuft mit beinahe konstanter Steigung bis zum Phasenübergang. Im Phasenübergang nimmt die Steigung ab, aufgrund der hohen Wärmekapazität des PCM's. Nach ca. 2.2 h steigt die HTF-Temperatur bereits stärker an, obwohl sich das PCM in S9 immer noch im Phasenübergang befindet. Dann hat das PCM in S5 den Phasenübergang bereits abgeschlossen (siehe Abbildung 40), wodurch die Temperaturen in allen Schichten schneller ansteigen. Nach dem Phasenübergang nähert sich die HTF-Temperatur der Ladetemperatur asymptotisch.

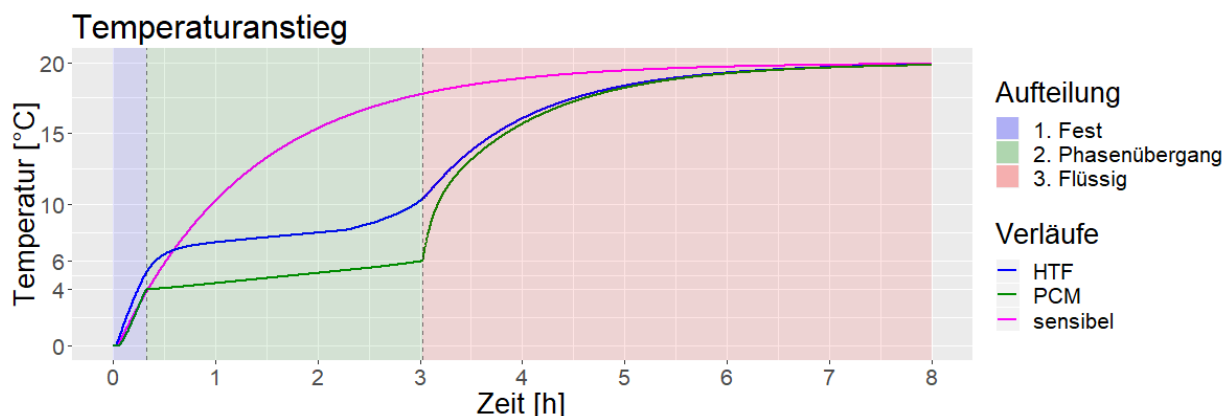


Abbildung 44: Temperaturanstieg in S9, von HTF und PCM sowie in einem sensiblen Speicher, bei Standardbedingungen.

Beim Temperaturverlauf gilt grundsätzlich je tiefer die Temperatur im Speicher, desto mehr Wärme wird dem Speicher zugeführt. Bei einem hohen Wärmeübergang vom HTF zum PCM und einer hohen Wärmekapazität kann der Speicher besser geladen werden als bei tiefem Wärmeübergang und niedriger Wärmekapazität.

Entladeverhalten

Das Entladeverhalten wird auch aufgrund der drei Phasen vom PCM unterteilt und durch die Betrachtung der entnommenen Wärme und der Leistung untersucht.

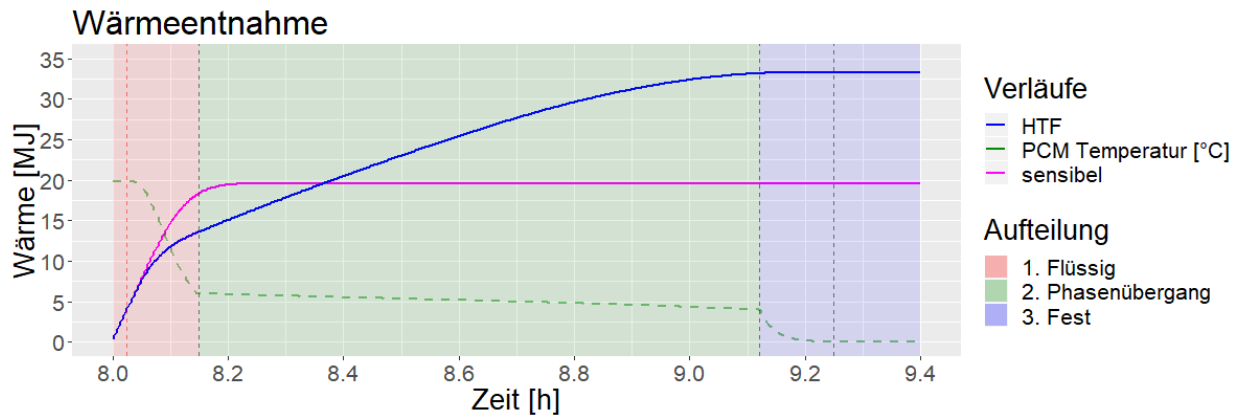


Abbildung 45: Wärmeentnahme aus einem PCM-Speicher und einem sensiblen Speicher. Der Temperaturverlauf vom PCM ist in grün dargestellt, dabei entsprechen die Zahlenwerte der Wärme den Temperaturen in °C.

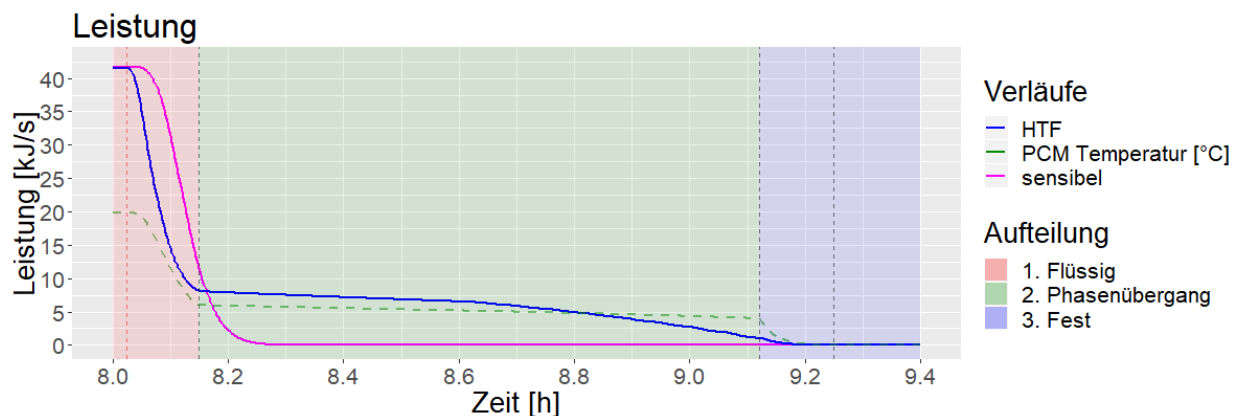


Abbildung 46: Leistungsverlauf beim Entladen eines PCM-Speichers und einem sensiblen Speichers. Der Temperaturverlauf vom PCM ist in grün dargestellt, dabei entsprechen die Zahlenwerte der Wärme den Temperaturen in °C.

Die Abbildung 45 und Abbildung 46 beziehen sich beide auf die Wärmeentnahme des PCM-Speichers und des sensiblen Speichers. Die Wärme pro Zeitschritt wird wie folgt berechnet: $Q = T * \Delta t * c_{p_{HTF}} * \dot{m}$. In Abbildung 45 wird die kumulierte Wärme dargestellt. Die Leistung wird wie folgt berechnet: $P = T * c_{p_{HTF}} * \dot{m}$. Beim Wärme- und dem Leistungsverlauf werden die einzelnen Teile gemeinsam analysiert. Es folgt eine genaue Analyse der einzelnen Teile.

1. Das PCM befindet sich im flüssigen Zustand. Bis zur roten, vertikal gestrichelten Linie bleiben die Temperatur des PCMs, sowie die Leistung und die Steigung der kumulierten Wärme konstant. Dabei fließt das bereits warme HTF aus dem Speicher. Über die PCM-Parameter können die Wärmemenge und die Höhe der Leistung bestimmt werden.
 - Die Wärmemenge dieses konstanten Bereiches hängt von der Füllichte ab. Je kleiner die Füllichte, desto mehr vorgewärmtes HTF liegt im Speicher vor, dadurch erhöht sich die schnell beziehbare Wärmemenge. Beim sensiblen Speicher dauert die konstante Phase zu Beginn ungefähr doppelt so lange wie im PCM-Speicher, da im PCM-Speicher mit einer Füllichte von 0.5 gerechnet wird.

- Die Leistung wird erhöht, wenn mehr Wärme pro Zeit entnommen wird. Dies kann durch einen höheren Massenstrom oder eine höhere HTF-Temperatur erreicht werden.

Nach der roten, vertikal gestrichelten Linie sinkt die beziehbare Leistung, bis sich das PCM im Phasenübergang befindet.

Im sensiblen Speicher fällt die beziehbare Leistung anschliessend auf 0 kJ/s, weil die Wärme nur im HTF gespeichert wird. Im sensiblen Speicher kann bei gleichem Speichervolumen weniger Wärme gespeichert werden, dafür kann die gespeicherte Wärme mit einer höheren Leistung bezogen werden, als in einem PCM-Speicher.

2. Das PCM befindet sich im Phasenübergang. Durch die konstante Temperatur im PCM, aufgrund der hohen Schmelzwärme, stellt sich eine leicht abfallende Leistung ein.
 - Diese Leistung kann durch die Erhöhung des Wärmeübergangs zwischen PCM und HTF gesteigert werden.
 - i. Der Wärmeübergang wird durch Vergrössern des Massenstroms, der Wärmeleitfähigkeit, der Füllichte und Verkleinern der PCM-Radien gesteigert.
 - Die beziehbare Wärmemenge kann durch Erhöhen der Wärmekapazität vergrössert werden.
 - i. Die Wärmekapazität wird durch Erhöhen der PCM-Dichte, der spezifischen Wärmekapazität (vor allem Schmelzwärme) und der Füllichte vergrössert.

Nach ca. 8.6 h sinkt die Leistung stärker, dann liegt in S1 das PCM im festen Zustand vor (siehe Abbildung 40), wodurch das HTF schwächer erwärmt wird.

3. Das PCM befindet sich im festen Zustand. Aufgrund der niedrigen Temperaturen und der niedrigen spezifischen Wärmekapazität, kann in diesem Bereich kaum Wärme entnommen werden. Weil der Phasenübergang so tief liegt, ist der Einfluss vom festen Zustand auf das Speicherverhalten sehr gering. Durch eine Erhöhung des Temperaturunterschieds zwischen Schmelzbereich und Entladetemperatur kann dieser Bereich erhöht werden.

Die PCM-Speicher weisen immer dieses Verhalten auf, wodurch über den Vergleich von mehreren Kurven gesagt werden kann, welche eine höhere Wärmekapazität oder Wärmeübertragung aufweist. Die Leistungsentnahme wird definiert durch den ersten Teil, bei welchem kurzfristig eine hohe Leistung und den zweiten Teil, bei welchem über eine längere Zeit eine niedrigere Leistung bezogen werden kann.

4 Resultate

4.1 Untersuchung der Parameter im PCM-Speicher

Es wird untersucht, wie sich einzelne Parameter auf das Speicherverhalten auswirken, wobei sich jeweils nur der zu untersuchende Parameter ändert. Zur Untersuchung der Parameter werden die Verläufe der Temperatur, der kumulierten Wärme sowie der Leistung dargestellt. Durch den Temperaturverlauf wird das gesamte Speicherverhalten beim Laden und Entladen ersichtlich. Die kumulierte Wärme und die Leistung beziehen sich nur auf das Entladen, da nur dieses Verhalten für die Auswertung von Interesse ist. Bei den absoluten Verläufen sind die maximalen und minimalen Unterschiede kaum ersichtlich, weshalb zu jeder dieser Darstellungen der relative Verlauf zum Parameter mit der geringsten Leistung (Referenzparameter) oder zum sensiblen Speicher dargestellt wird. Über die relativen Verläufe werden die Einflüsse der Parameter ausgewertet. Die relativen Werte werden wie folgt berechnet:

$$\text{relative Werte} = \frac{\text{Werte bei untersuchtem Parameter}}{\text{Werte bei Referenzparameter}}$$

Die relativen Verläufe sind nur solange dargestellt, wie der Referenzparameter ≥ 1 ist, da zu kleine Werte nicht von Interesse sind.

4.1.1 Unterschiedliche Auswertungen

Die Auswertung erfolgt über die relativen Werte der kumulierten Wärme und der Leistung, sowie über die Zeit, zu welcher unterschiedliche Wärmemengen aus dem Speicher entnommen werden können. Die relative Temperatur wird nicht ausgewertet, da sich diese bei gleichbleibendem Massenstrom gleich wie die relative Leistung verhält. Die Auswertung der Wärme und der Leistung wird bei der Wärmekapazität und beim Wärmeübergang unterschiedlich durchgeführt. Beim Temperaturniveau erfolgt die Auswertung individuell. Die einzelnen Auswertungen werden in den kommenden Kapiteln noch genauer beschrieben. Diese Auswertungen ermöglichen es, die unterschiedlichen Einflüsse der Parameter in Faktoren zu fassen, dadurch lassen sich die Parameter in Relation zueinander setzen.

Auswertung Wärmeübergang

Der Wärmeübergang vom HTF zum PCM ist nur in einem PCM-Speicher vorhanden, daher findet die Auswertung nur über die PCM-Parameter statt.

Die mittleren Werte (in der Legende als «mean» bezeichnet) besagen, wie viel grösser die relativen Werte eines Parameters durchschnittlich gegenüber dem Referenzparameter sind. Dazu

werden nur die Werte verwendet, bei welchen die relative Leistung grösser als eins sind (Werte aus rot markiertem Bereich in Abbildung 47).

Das maximale Wärmeverhältnis (gelber Punkt in Abbildung 47 «Wärmeentnahme Relativ») besagt, wie viel mehr Wärme frühzeitig beim zu untersuchenden Parameter gegenüber dem Referenzparameter aus dem Speicher entnommen werden kann. Dieser Wert ist unabhängig von der maximalen Wärmekapazität. Das maximale Wärmeverhältnis ergibt sich (ausser beim Massenstrom) kurz bevor die komplette Wärme aus dem Speicher ausgetreten ist (siehe Abbildung 47). Dieser Maximalwert besagt, wie viel mehr Wärme maximal aus dem Speicher zu einem früheren Zeitpunkt entnommen werden kann.

Das maximale Leistungsverhältnis (blauer Punkt in Abbildung 47 «Wärmeentnahme Relativ») sagt aus, wie viel mehr Leistung maximal gegenüber dem Referenzparameter bezogen werden kann. Das maximale Leistungsverhältnis bildet sich (ausser beim Massenstrom) dann, wenn das PCM beim Referenzparameter in den Phasenübergang wechselt (siehe Abbildung 47), wobei die Wärme hauptsächlich über den Wärmeübergang vom PCM an das HTF übertragen wird. Dieser Maximalwert besagt, wie viel mehr Leistung durch das PCM zum HTF fliesst.

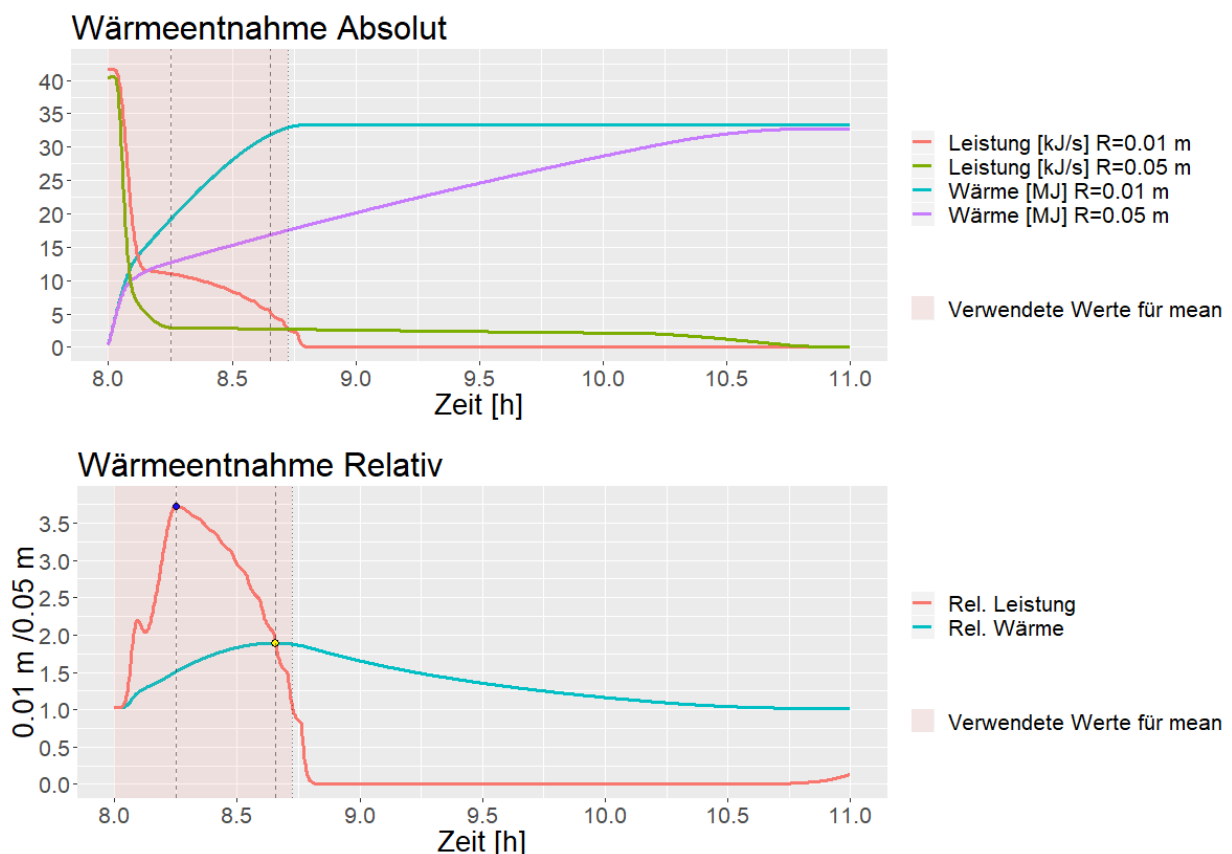


Abbildung 47: «Wärmeentnahme Absolut» stellt die absoluten Werte der Leistung und der Wärme bei PCM-Radien von 0.01 m und 0.05 m dar. «Wärmeentnahme Relativ» stellt die relativen Werte der Leistung und der Wärme bezogen auf den PCM-Radius 0.05 m dar. Im Vergleich wird ersichtlich, wo sich die Maximalwerte bilden. Zur Berechnung der Mittelwerte (mean) wurden die Werte aus dem rot markierten Feld verwendet.

Auswertung Wärmekapazität

Im Gegensatz zum Wärmeübergang kann die Wärmekapazität vom PCM-Speicher mit der des sensiblen Speichers verglichen werden. Daher wird der «Wärmeverlauf relativ» im Verhältnis zum sensiblen Speicher dargestellt. Dies veranschaulicht das zusätzliche Potential vom PCM-Speicher gegenüber dem sensiblen Speicher. Die Auswertung findet über den relativen Unterschied zum Referenzparameter statt, damit die Veränderung der Wärmekapazität in Relation zu den Parametern gesetzt werden kann. Bei der Füllichte bezieht sich die Auswertung auf den relativen Unterschied zum sensiblen Speicher.

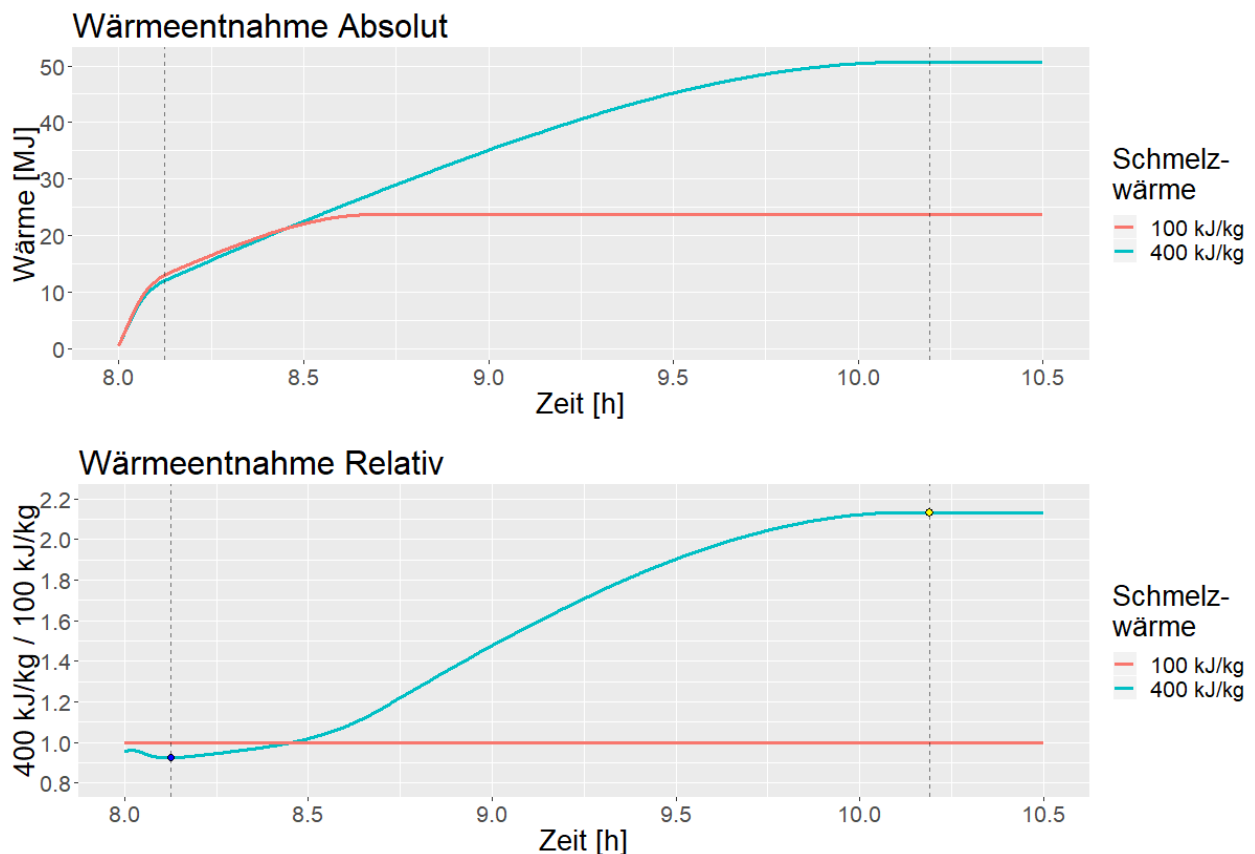


Abbildung 48: «Wärmeentnahme Absolut» stellt die absoluten Werte der Wärme bei Schmelzwärmen von 100 kJ/kg und 400 kJ/kg dar. «Wärmeentnahme Relativ» stellt die relativen Werte der Wärme bezogen auf eine Schmelzwärme von 100 kJ/kg dar. Im Vergleich wird ersichtlich, wo sich der Maximalwert (gelber Punkt) und der Minimalwert (blauer Punkt) bilden.

Die Auswertung erfolgt über das maximale (gelber Punkt in Abbildung 48 Wärmeentnahme Relativ) und das minimale Wärmeverhältnis (blauer Punkt in Abbildung 48 Wärmeentnahme Relativ) gegenüber der niedrigsten Wärmekapazität. Das maximale Wärmeverhältnis besagt, wie viel mehr Wärme aus dem PCM-Speicher insgesamt bezogen werden kann. Das minimale Wärmeverhältnis besagt, wie viel weniger Wärme zu einem frühzeitigen Zeitpunkt bezogen werden kann. Bei höherer Wärmekapazität werden nach dem Laden oft tiefere Temperaturen erreicht als bei kleineren Wärmekapazitäten. Das minimale Wärmeverhältnis dient dazu, aufzuzeigen wie stark die Erhöhung der Wärmekapazität die kurzfristig beziehbare Leistung reduziert.

Zeitliche Auswertung

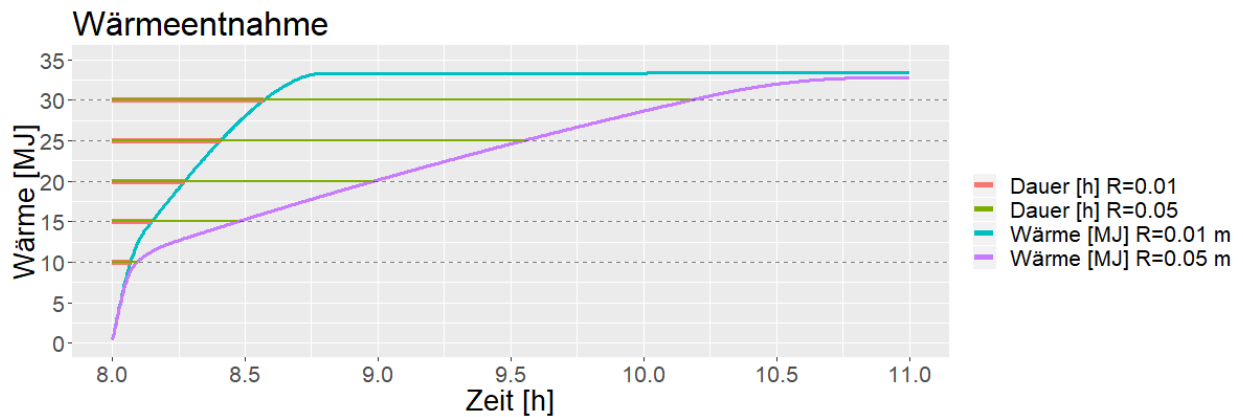


Abbildung 49: Dauer der Wärmeentnahme von vorgegebenen Wärmemengen. In diesem Fall wird die Dauer bis die Wärmemenge bei einem PCM-Radius von 0.05 m erreicht wird durch die Dauer bei einem PCM-Radius von 0.01 m geteilt. Zur Veranschaulichung wird die Dauer bis die jeweilige Wärmemenge bei dem zu untersuchenden PCM-Radius erreicht wird als Linie dargestellt.

Es wird ausgewertet, nach welcher Zeit 10 MJ, 15 MJ, 20 MJ, 25 MJ und 30 MJ aus dem Speicher entnommen werden können (siehe Abbildung 49). Diese Zeiten werden absolut und relativ zum leistungsstärksten Parameter dargestellt um den zeitlichen Unterschied zu den anderen Parametern zu zeigen.

4.1.2 Wärmeübergang

Der Wärmeübergang gilt als limitierender Faktor von PCM-Speichern. Der Wärmeübergang berechnet sich nach $\dot{Q} = \alpha * A * \Delta T$ und hängt von der Wärmeübergangszahl, der Übertragungsfläche und dem Temperaturunterschied zwischen HTF und PCM ab. Die Wärmeübergangszahl α berechnet sich nach der Formel gemäss Verein Deutscher Ingenieure & Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2013) und ist vom PCM-Radius, der Wärmeleitfähigkeit vom PCM, der Durchflussgeschwindigkeit und der Füllichte abhängig. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen dieser Parameter auf die Wärmeübergangszahl werden diese bei unterschiedlichen Parameterwerten dargestellt. In Abbildung 50 links wird die Abhängigkeit zwischen der Wärmeübergangszahl $[W/(m^2 \cdot K)]$ und der Durchflussgeschwindigkeit $[m/s]$, in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit $[W/(m \cdot K)]$ bei einem PCM-Radius von 0.02 m, dargestellt. Für den Massenstrom von 0.03 kg/s und 0.5 kg/s ergeben sich im Speicher Durchflussgeschwindigkeiten von ca. 0.0001 m/s und ca. 0.0017 m/s. In Abbildung 50 rechts wird der Einfluss der PCM-Radien $[m]$ und in Abbildung 51 links wird der Einfluss der Füllichte $[-]$, jeweils bei einer Durchflussgeschwindigkeit von 0.0017 m/s, veranschaulicht.

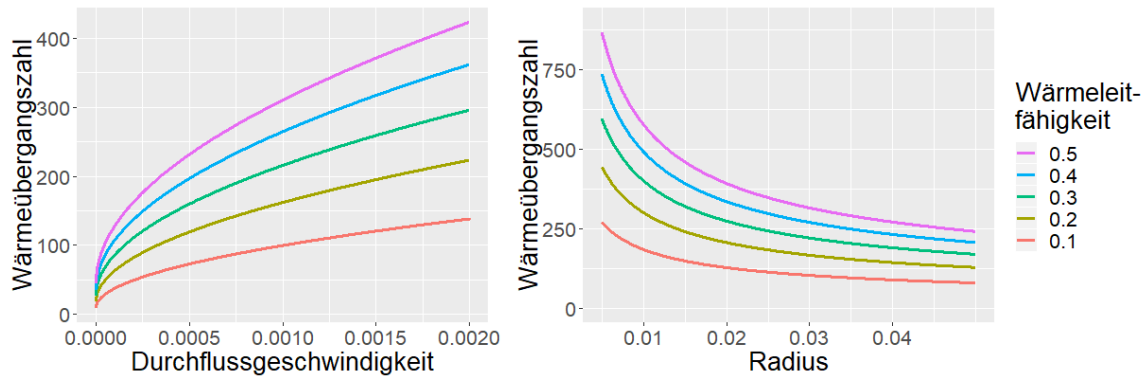


Abbildung 50: Wärmeübergangszahl, bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten [m/s] (links) und bei unterschiedlichen Radien [m] (rechts) abhängig von den Wärmeleitfähigkeiten [W/(m²·K)].

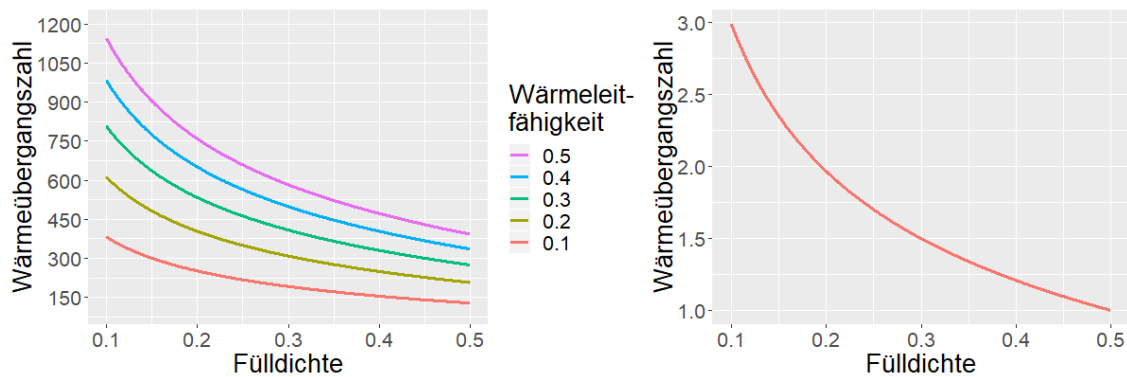


Abbildung 51: Wärmeübergangszahl bei unterschiedlicher Fülldicke [-] abhängig von der Wärmeleitfähigkeit [W/(m²·K)] (links). Wärmeübergangszahl relativ zu der Fülldicke von 0.5 [-] (rechts).

Abbildung 50 und Abbildung 51 veranschaulichen, dass die Wärmeübergangszahl erhöht wird durch:

- Erhöhen der Durchflussgeschwindigkeit
- Erhöhen der Wärmeleitfähigkeit
- Verkleinern des PCM-Radius
- Verkleinern der Fülldicke

In Abbildung 51 rechts wird das relative Verhältnis von Wärmeübergangszahl zur Fülldicke dargestellt. Die Wärmeübergangszahl α ist bei einer Fülldicke von 0.1 drei Mal grösser als bei einer Fülldicke von 0.5, dafür ist die Wärmeübergangsfläche A bei einer Fülldicke von 0.5 fünf Mal grösser als bei einer Fülldicke von 0.1. Somit ist der Wärmeübergang $\dot{Q} = \alpha * A * \Delta T$ bei einer höheren Fülldicke insgesamt grösser.

Zur Klärung, wie stark die einzelnen Parameter das gesamte Speicherverhalten beeinflussen, werden diese Parameter mit unterschiedlichen Werten simuliert. Der Einfluss der Fülldicke wird im Kapitel 4.1.3 untersucht.

Wärmeleitfähigkeit PCM

Die Wärmeleitfähigkeit des PCMs beeinflusst die Wärmeübergangszahl zwischen PCM und HTF. In den Verläufen der Abbildung 52 bis Abbildung 54 werden die Wärmeleitfähigkeiten von

0.1 W/(m*K) bis 0.6 W/(m*K) simuliert. Dabei wird ersichtlich, dass bei höheren Wärmeleitfähigkeiten der Speicher schneller geladen und entladen werden kann als bei kleinen Wärmeleitfähigkeiten.

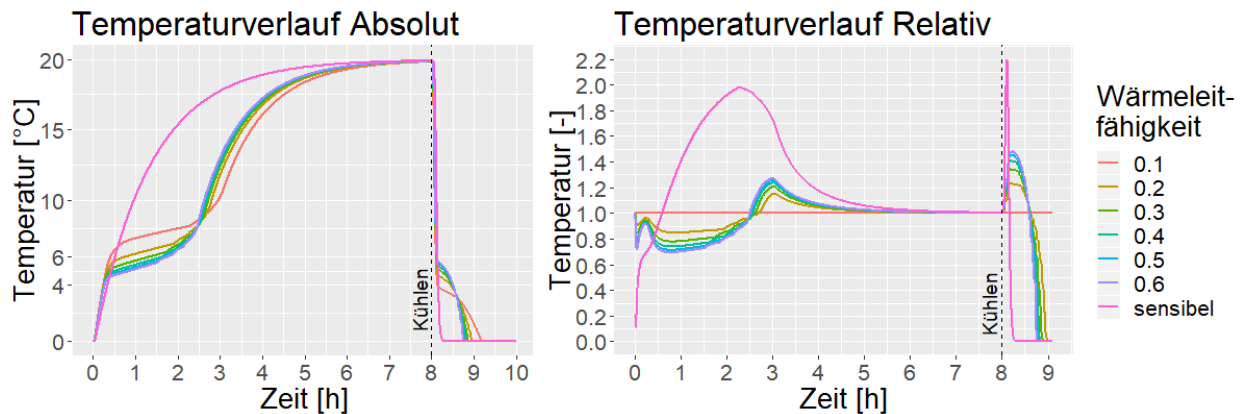


Abbildung 52: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten [W/(m*K)]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Wärmeleitfähigkeit von 0.1 W/(m*K) dargestellt.

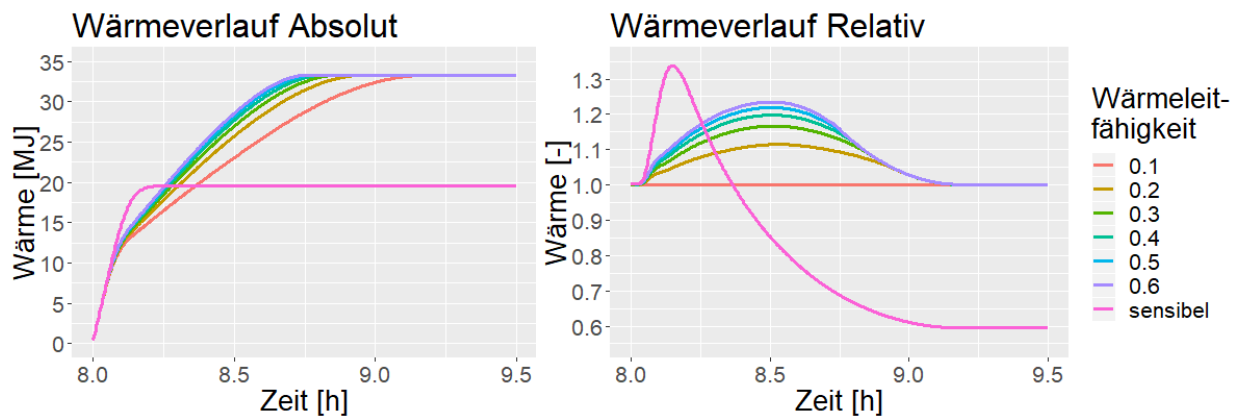


Abbildung 53: Kumulierte Wärme bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten [W/(m*K)]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einer Wärmeleitfähigkeit von 0.1 W/(m*K) dargestellt.

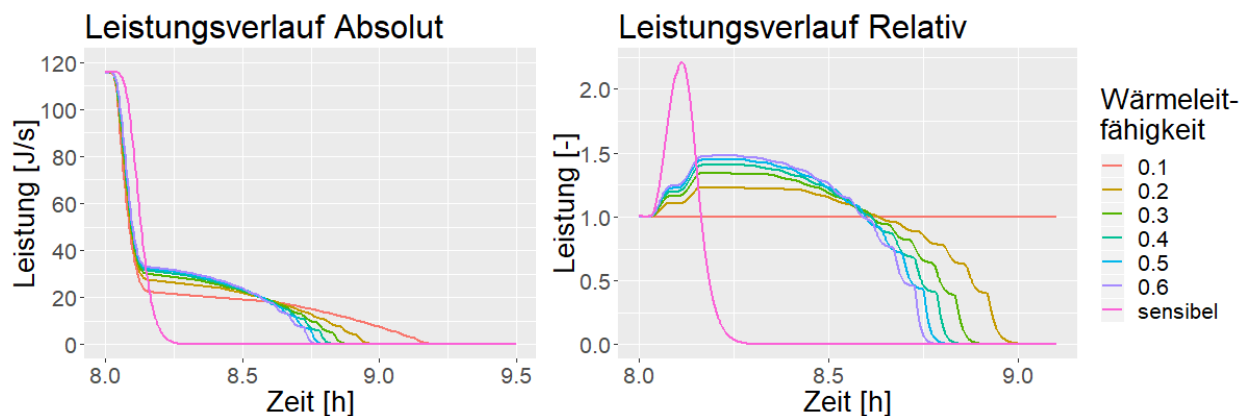


Abbildung 54: Leistungsverlauf bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten [W/(m*K)]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Wärmeleitfähigkeit von 0.1 W/(m*K) dargestellt.

PCM-Radius

Durch einen kleineren PCM-Radius vergrößern sich die Wärmeübergangszahl und die Wärmeaustauschoberfläche zwischen PCM und HTF, zusätzlich kann die Füllichte leicht erhöht

werden. Für die Untersuchung wird mit einer Füllichte von 0.5 gerechnet und nicht mit der maximal möglichen Füllichte. In Abbildung 55 bis Abbildung 57 werden die Einflüsse von Radien zwischen 0.01 und 0.05 m ersichtlich. Die Kurven unterscheiden sich stärker voneinander als beim Einfluss der Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 52 bis Abbildung 54).

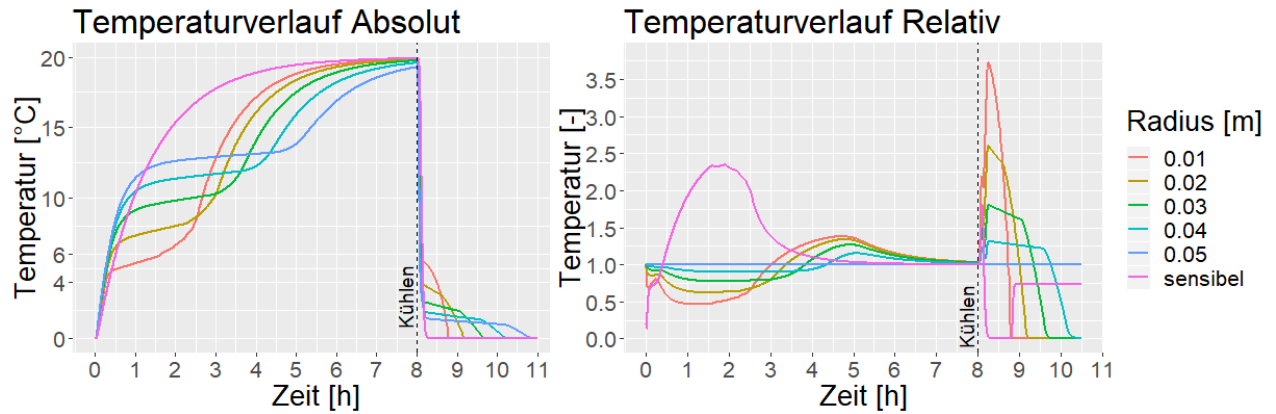


Abbildung 55: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Radien [m]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einem Radius von 0.05 m dargestellt.

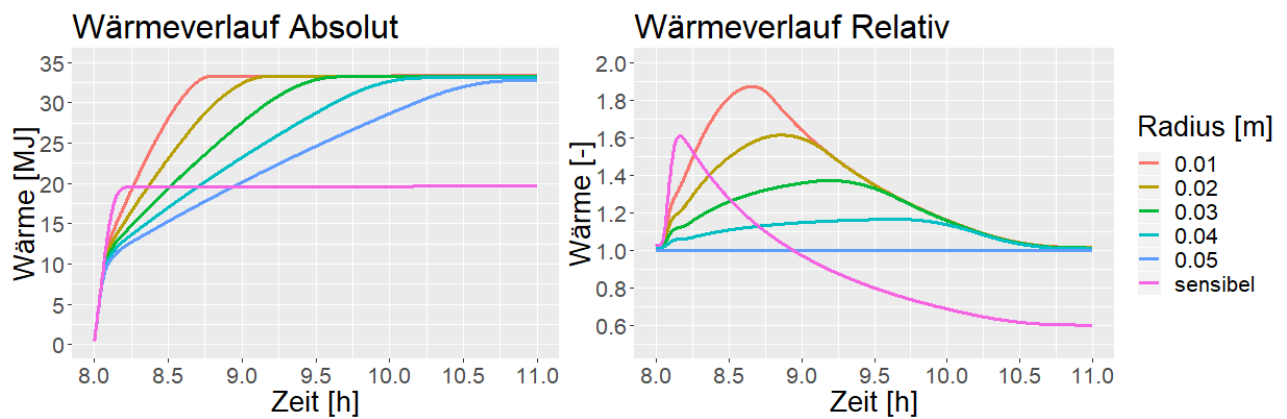


Abbildung 56: Wärmeverlauf vom HTF bei unterschiedlichen Radien [m]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Radius von 0.05 m dargestellt.

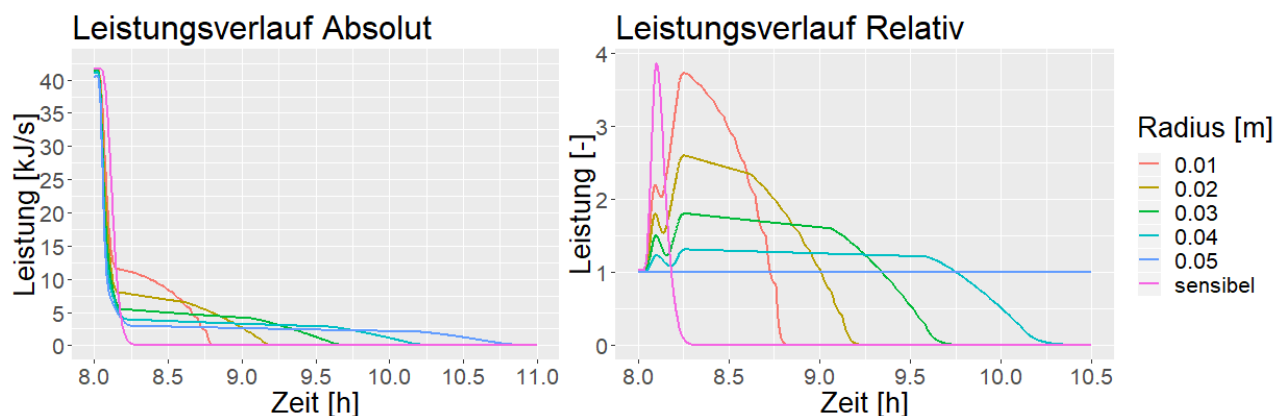


Abbildung 57: Leistungsverlauf vom HTF bei unterschiedlichen Radien [m]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Radius von 0.05 m dargestellt.

Massenstrom

Der Massenstrom beeinflusst die Wärmeübergangszahl aufgrund der Umströmung der PCM-Kugeln. Bei unterschiedlichen Massenströmen wird unterschiedlich viel HTF in den Speicher eingebracht. Der Massenstrom beeinflusst deshalb den Wärmübergang auch durch den Temperaturunterschied zwischen PCM und HTF. Für die Untersuchung startet der Speicher bei einer Temperatur von 20 °C, anschliessend wird die Wärme bei unterschiedlichen Massenströmen zwischen 0.03 kg/s bis 0.5 kg/s bei 0 °C entnommen. In Abbildung 58 bis Abbildung 60 wird ersichtlich, dass die Temperatur-, Wärme- und Leistungsverläufe durch den Massenstrom gesteuert werden können. Der Verlauf eines sensiblen Speichers wird nur im Temperaturverlauf in Abbildung 58 dargestellt. Dadurch wird ersichtlich wieviel schneller der sensible Speicher, im Vergleich zum PCM-Speicher bei unterschiedlichen Massenströmen, entladen werden kann.

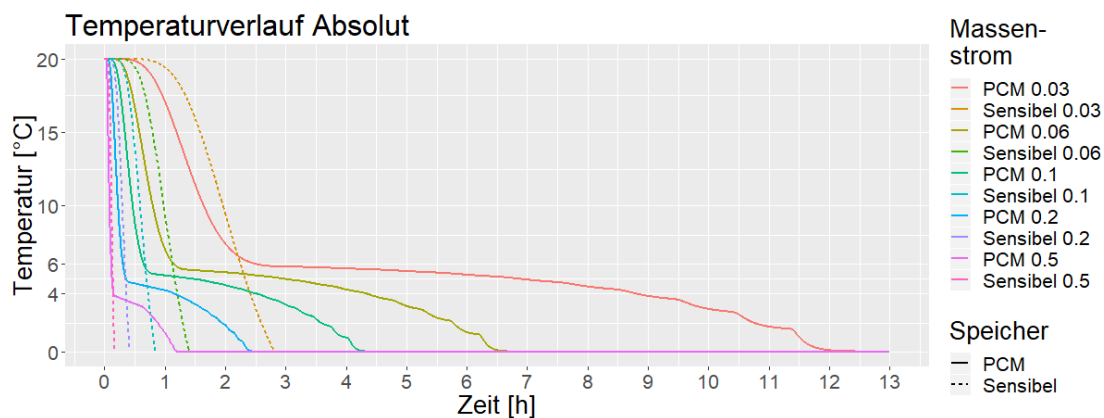


Abbildung 58: Temperaturverlauf von HTF im sensiblen Speicher und im PCM-Speicher bei unterschiedlichen Massenströmen [kg/s].

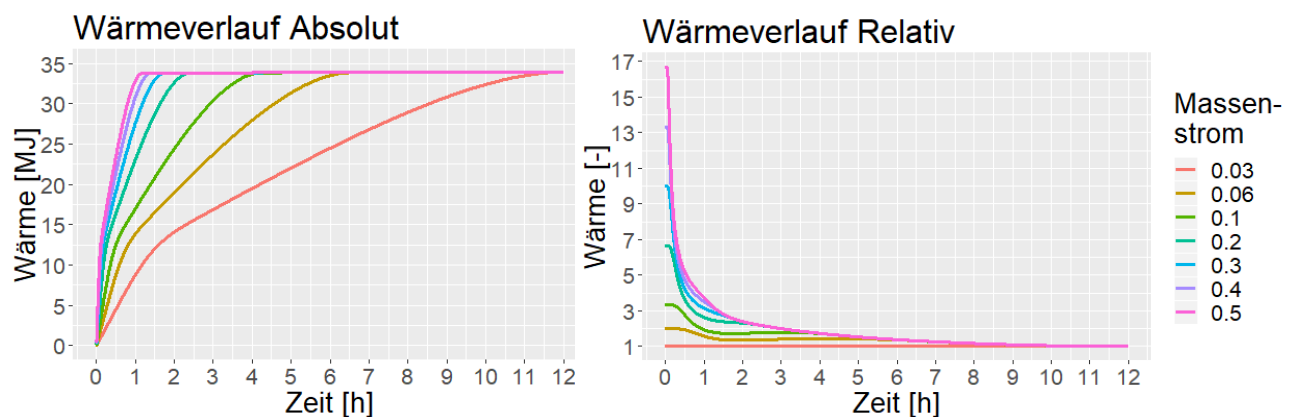


Abbildung 59: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Massenströmen [kg/s]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Massenstrom von 0.03 kg/s dargestellt.

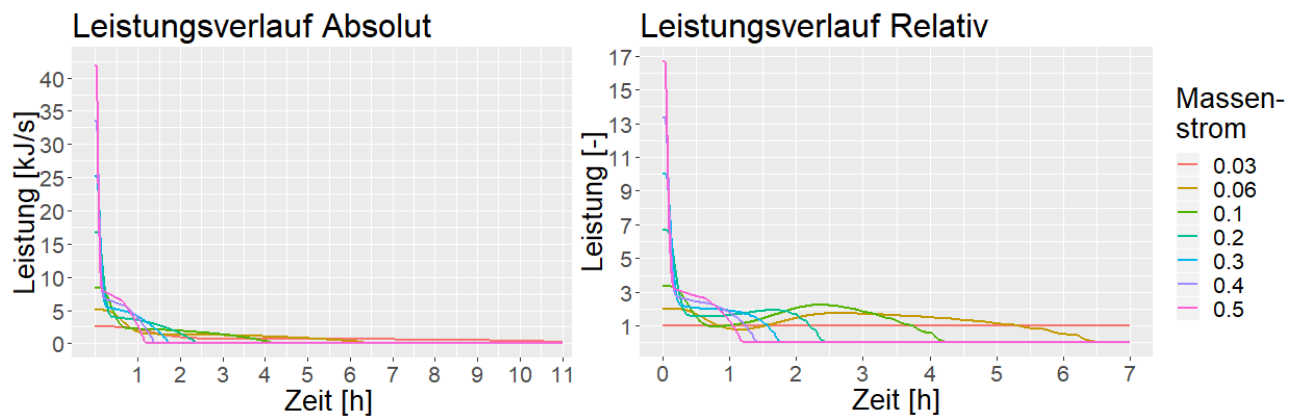


Abbildung 60: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Massenströmen [kg/s]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Massenstrom von 0.03 kg/s dargestellt.

Auswertung Wärmeübergang

Wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, werden aus den maximalen und mittleren Leistungs- und Wärmeverhältnissen die Verläufe aus den unterschiedlichen Parametern in Abbildung 61 dargestellt. Daraus werden folgende Verhalten ersichtlich:

- Die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst die Leistung degressiv: Durch noch höhere Wärmeleitfähigkeiten wird die Leistung kaum verbessert.
- Der Radius beeinflusst die Leistung regressiv: Je kleiner der Radius, desto höher die Leistung.
- Der Massenstrom beeinflusst die Leistung proportional.

Beim Massenstrom wurde der grösste Parameterbereich gewählt, wodurch die grösste Veränderung ersichtlich ist. Beim Massenstrom sind gerade die Maximalewerte zu Beginn sehr gross, wobei hohe Wärmemengen entnommen werden. Dadurch liegt ausnahmsweise das mittlere Wärmeverhältnis über dem mittleren Leistungsverhältnis. Grundsätzlich kann mit dem Massenstrom die Wärmeentnahme gut gesteuert werden. Eine Erhöhung des Massenstromes führt zu einem höheren Stromverbrauch, daher soll der Wärmeübergang wenn möglich durch einen kleinen Radius oder einer hohe Wärmeleitfähigkeit erhöht werden. Ein kleinerer PCM-Radius wirkt sich stärker aus als eine grössere Wärmeleitfähigkeit, daher ist ein kleiner PCM-Radius vorzuziehen.

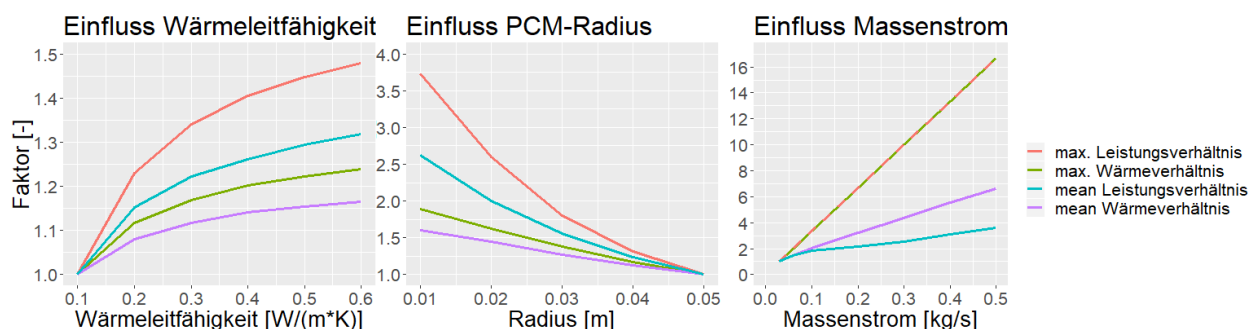


Abbildung 61: Die maximalen und mittleren Werte aus dem «Wärmeverlauf Relativ» und dem «Leistungsverlauf Relativ».

Zeitliche Auswertung

Wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, wird die Zeitdauer bis die vorgegebenen Wärmemengen aus dem Speicher entnommen werden mit einander verglichen. In Abbildung 62 wird ersichtlich, dass eine Erhöhung des Wärmeübergangs die Dauer der Wärmeentnahme verkürzt.

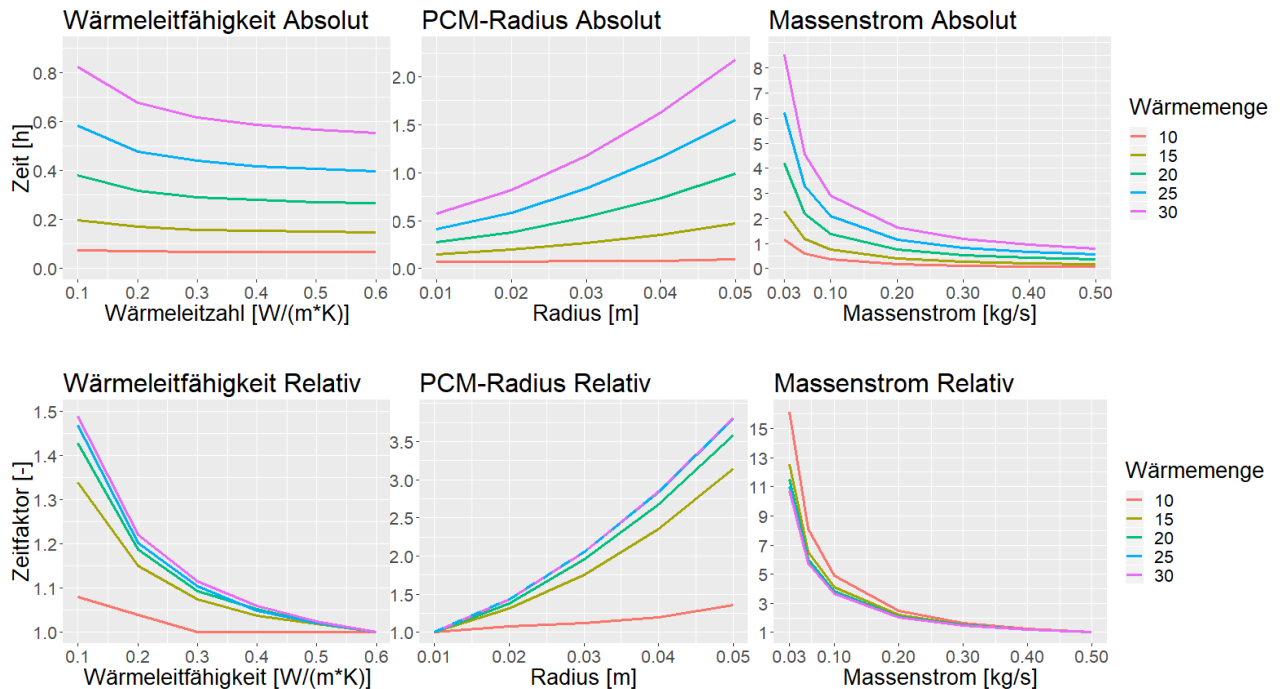


Abbildung 62: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Es werden die absoluten und relativen Werte der Parameter aus dem Kapitel Wärmeübergang dargestellt.

4.1.3 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität wird durch die PCM-Dichte, die Schmelzwärme des PCMs und die Füllichte beeinflusst. In Abbildung 63 wird dargestellt, wie viel Wärme im betrachteten Speicher bei unterschiedlicher Füllichte und Schmelzwärme gespeichert werden kann. Die rechte y-Achse in Abbildung 63 zeigt, um welchen Faktor sich die Wärmekapazität im PCM-Speicher relativ zu einem sensiblen Speicher erhöht. Abbildung 63 dient nur als quantitativer Vergleich zwischen der speicherbaren Wärme im PCM-Speicher und im sensiblen Speicher. Je nach betrachteten Eingabewerten (Dichte, Schmelzwärme, Temperaturbereich, spezifische Wärmekapazität, Speichervolumen) ergeben sich andere Wärmemengen. Aus Abbildung 63 wird ersichtlich, dass bei den verwendeten Werten ab einer Schmelzwärme von 57 kJ/kg im PCM-Speicher mehr Wärme als im sensiblen Speicher gespeichert werden kann.

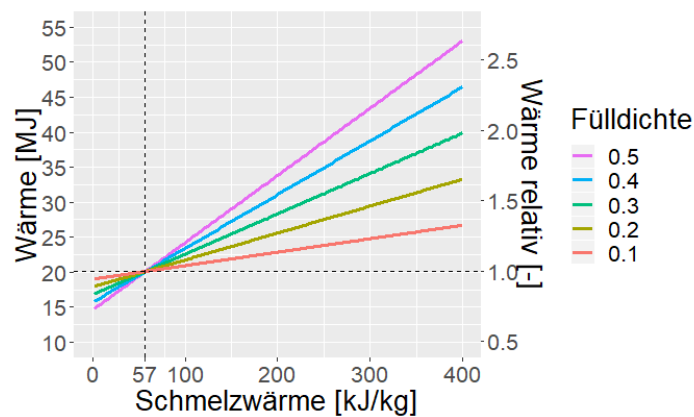


Abbildung 63: Die speicherbare Wärmemenge bei 20 °C (y-Achse links) und relativ zum sensiblen Speicher (y-Achse rechts) bei unterschiedlicher Füllichte und unterschiedlicher Wärmekapazität des PCMs.

In Abbildung 63 werden die Wärmekapazitäten wenn die Temperatur im Speicher 20 °C beträgt dargestellt. Der Speicher wird abhängig von der Wärmekapazität unterschiedlich stark geladen. Es folgt eine Beschreibung der Auswirkung von unterschiedlichen Wärmekapazitäten:

- Zu niedrige Wärmekapazität: Der Speicher kann am schnellsten geladen und entladen werden. Durch die höchsten Temperaturen nach dem Laden können kurzfristig die höchsten Leistungen bezogen werden.
- Angemessene Wärmekapazität: Die Temperatur im Speicher liegt nach dem Ladevorgang leicht unter der von einer zu niedrigen Wärmekapazität. Dafür kühlt der Speicher durch die hohe Wärmekapazität langsamer ab, wodurch die Wärmeentnahme durchschnittlich bei einer höheren Leistung stattfindet.
- Zu hohe Wärmekapazität: Die Temperatur liegt nach dem Ladevorgang am tiefsten. Dadurch ergibt sich eine geringe Leistungsentnahme und der Speicher kann nicht proportional mehr Wärme speichern, als bei einer kleineren Wärmekapazität. Trotzdem wird bei gleichem Ladeverhalten am meisten Wärme gespeichert, weil durch die tiefen Temperaturen im Speicher ein grösserer Temperaturunterschied zur Ladetemperatur als bei niedrigeren Wärmekapazitäten vorliegt.

PCM-Dichte

Die spezifische Wärmekapazität bezieht sich auf das Gewicht, wohingegen sich die Füllichte auf das Volumen bezieht. Daher weisen PCM mit höherer Dichte bei gleichbleibender spezifischer Wärmekapazität und Füllichte eine höhere Wärmekapazität im Speicher auf. In Abbildung 64 bis Abbildung 66 werden Dichten zwischen 800 kg/m³ und 1500 kg/m³ simuliert. Dabei wird ersichtlich, dass mit zunehmender Dichte die Wärmekapazität im Speicher erhöht wird.

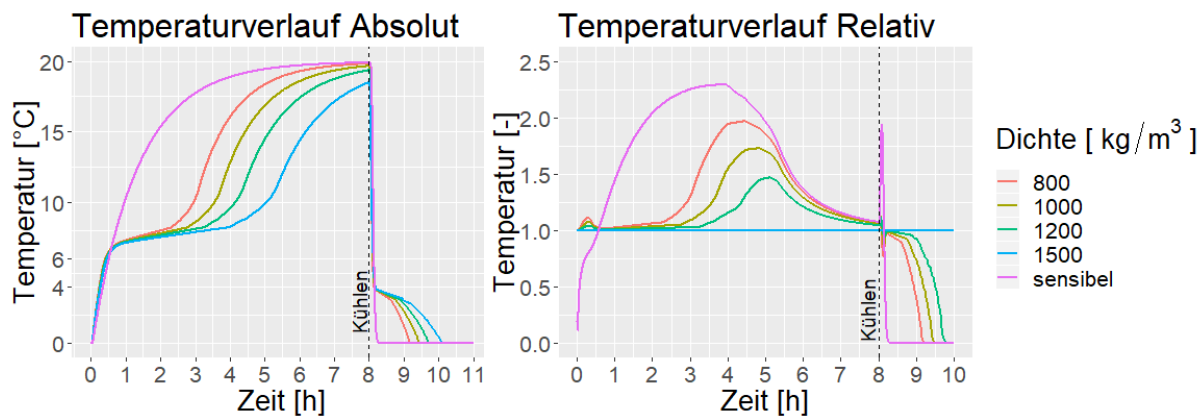


Abbildung 64: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Dichten [kg/m³]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Dichte von 1500 kg/m³ dargestellt.

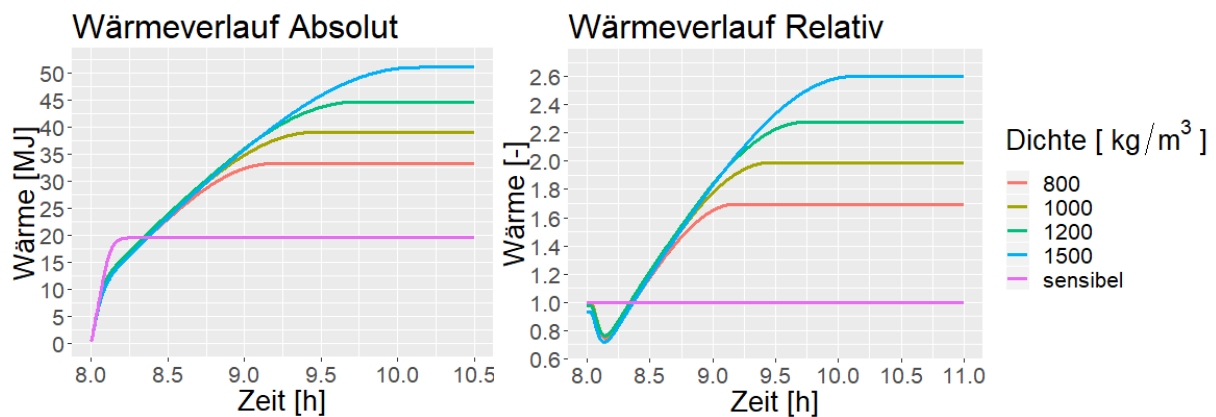


Abbildung 65: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Dichten [kg/m³]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.

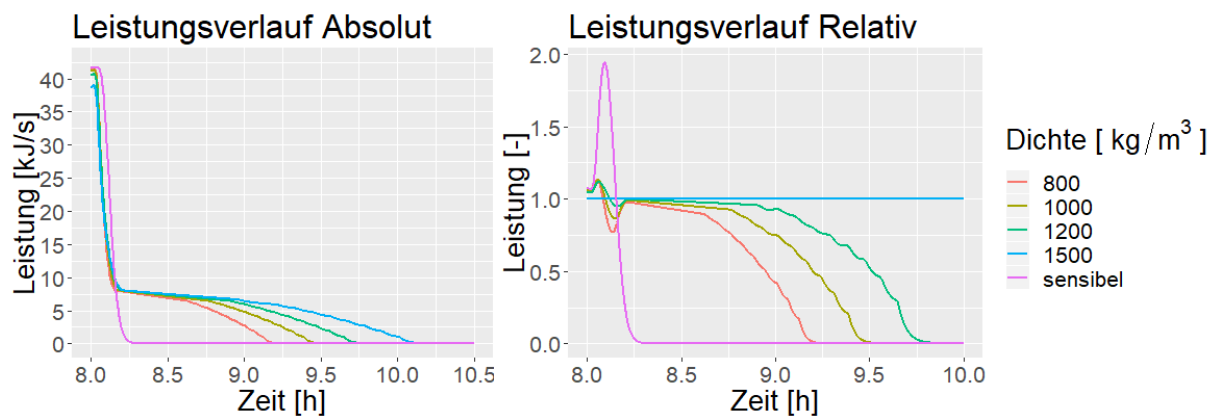


Abbildung 66: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Dichten [kg/m³]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Dichte von 1500 kg/m³ dargestellt.

Schmelzwärme

Die Schmelzwärme ist der Hauptgrund für den Einsatz von PCM in Wärmespeichern. Durch die Nutzung der Schmelzwärme kann in einem kleinen Temperaturbereich die Wärmekapazität stark erhöht werden. In Abbildung 67 bis Abbildung 69 werden Schmelzwärmen von 100 bis 400 kg/kJ untersucht. Dabei sind im Phasenübergang die Steigungen bei den unterschiedlichen Schmelzwärmen gleich, nur die Längen der Steigungen ändern sich. Dies führt zu einem

unterschiedlichen Ladeverhalten, welches auf die unterschiedlichen Temperaturen im Speicher zurückzuführen ist.

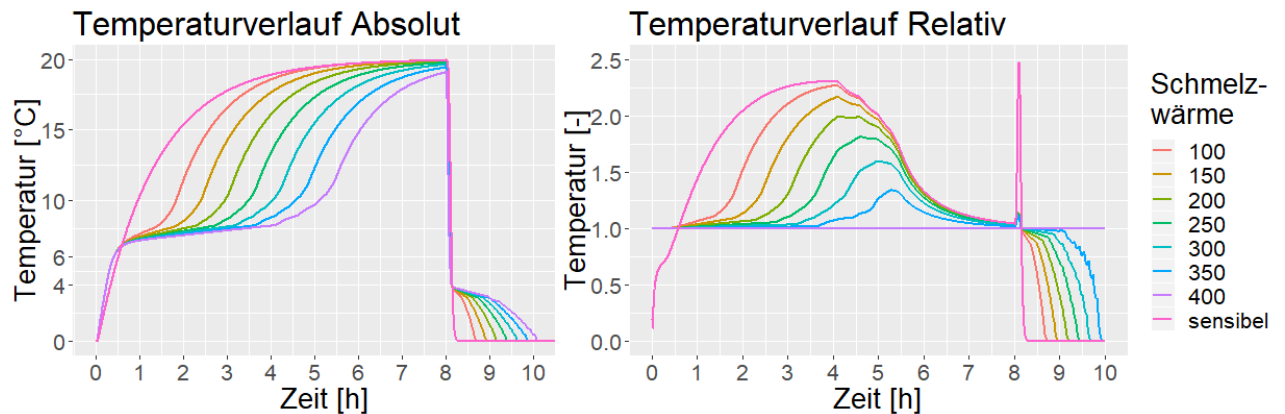


Abbildung 67: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlicher Schmelzwärme [kJ/kg]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Schmelzwärme von 400 kJ/kg dargestellt.

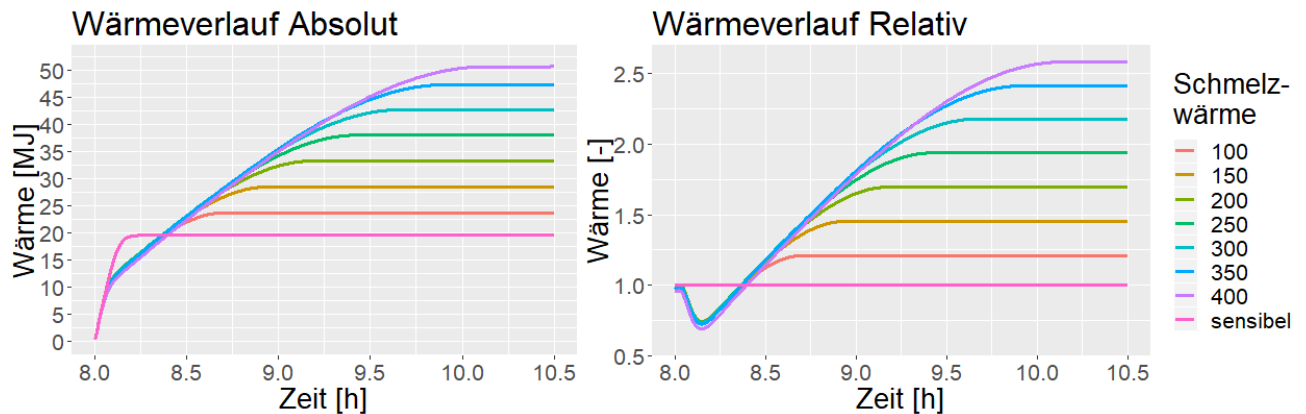


Abbildung 68: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlicher Schmelzwärme [kJ/kg]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.

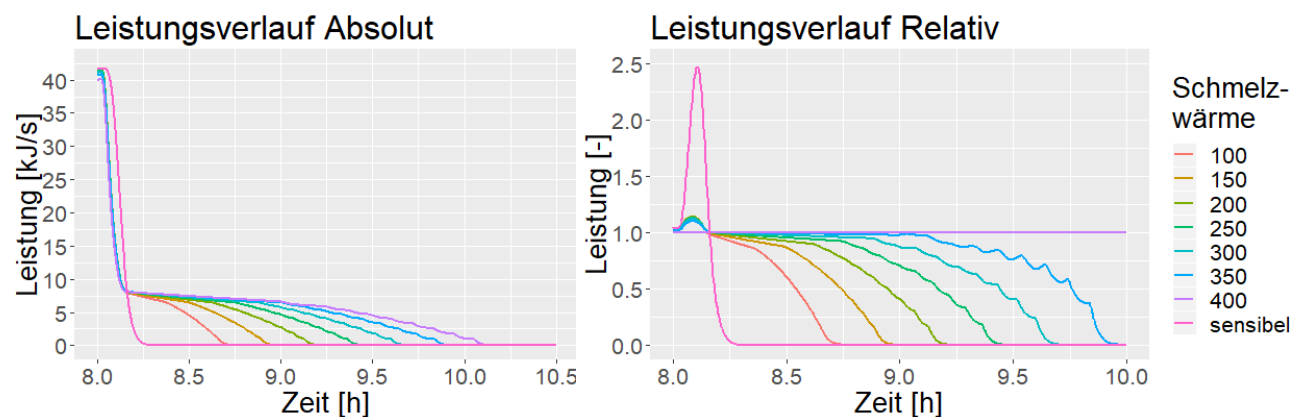


Abbildung 69: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlicher Wärmekapazität [kJ/kg]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Schmelzwärme von 400 kJ/kg dargestellt.

Fülldichte

Über die Fülldichte können das HTF-Volumen, die Wärmekapazität und die Wärmeübertragungsfläche zwischen PCM und HTF bestimmt werden. In Abbildung 70 bis Abbildung 72 werden Fülldichten zwischen 0 bis 0.5 untersucht, wobei eine Fülldichte von 0 einem

sensiblen Speicher entspricht. Je tiefer die Füllichte, desto ähnlicher verhält sich der PCM-Speicher wie ein sensibler Speicher. Bei tiefen Füllichten ist mehr HTF im Speicher vorhanden, wodurch mehr Wärme bei hoher Leistung bezogen werden kann, dafür ist die Wärmekapazität tief. Bei hohen Füllichten erhöht sich der Wärmeübergang aufgrund der grösseren Oberfläche und der höheren Wärmekapazität. Der höhere Wärmeübergang führt dazu, dass eine Füllichte von 0.5 die maximale Wärmekapazität der Füllichten 0.3 und 0.4 schneller erreicht (siehe Abbildung 71).

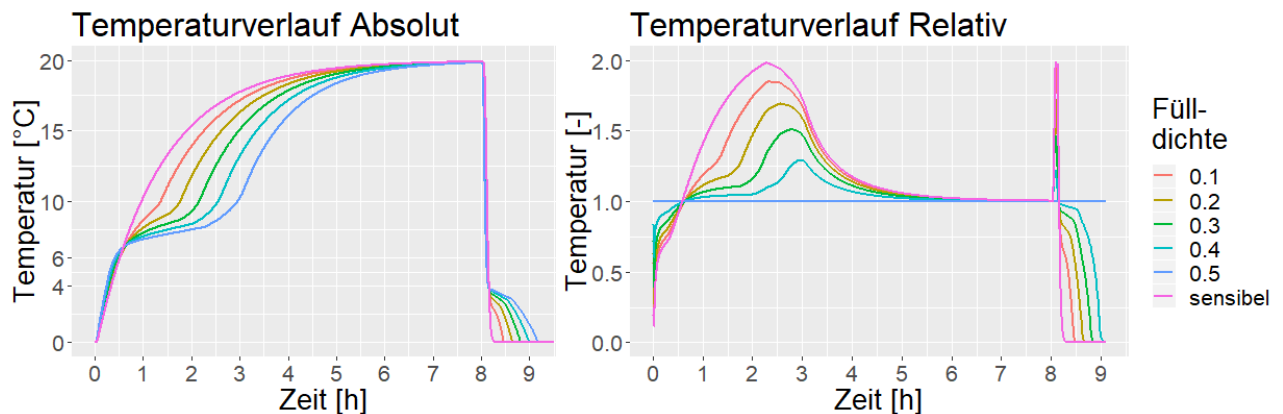


Abbildung 70: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Füllichten [-]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Füllichte von 0.5 dargestellt.

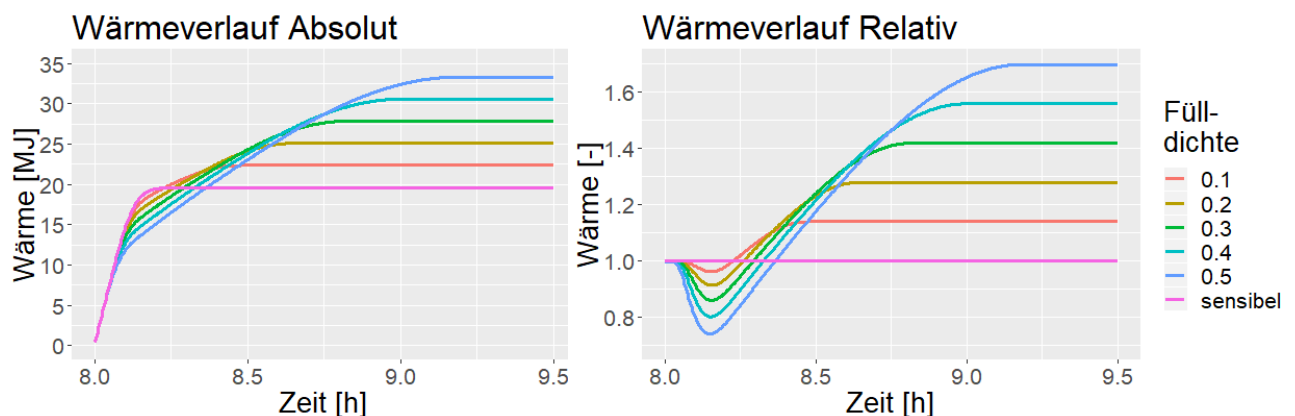


Abbildung 71: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Füllichten [-]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.

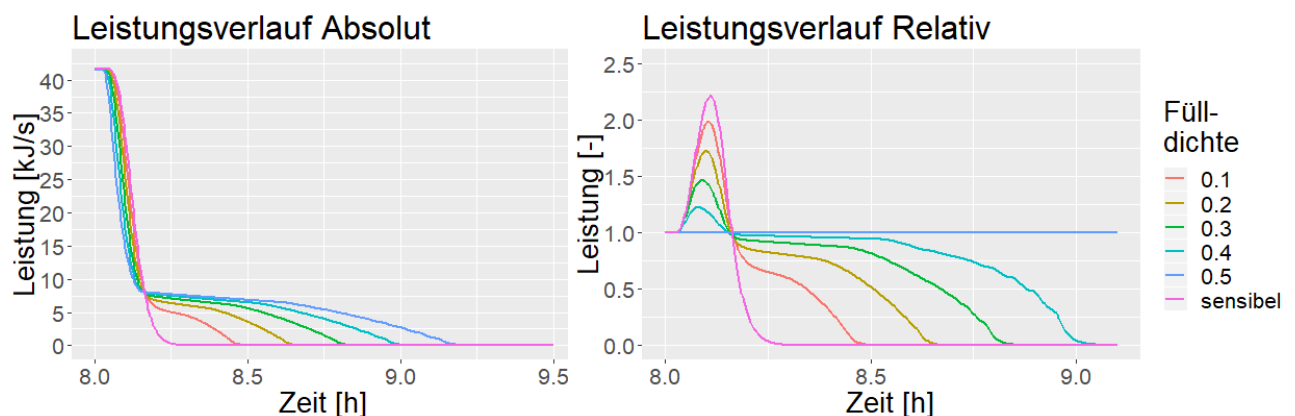


Abbildung 72: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Füllichten [-]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Füllichte von 0.5 dargestellt.

Vergleich der Füllichte mit der Schmelzwärme

Es stellt sich die Frage, ob die Wärmekapazität vom Speicher durch eine höhere Füllichte oder durch eine höhere Schmelzwärme im PCM erreicht werden soll. Zu dieser Überprüfung wird das Modell in Abbildung 73 bis Abbildung 75 bei Füllichten von 0.1 bis 0.5 bei einer gleichbleibenden Wärmekapazität von 25 MJ simuliert. Dabei wird die Schmelzwärme der jeweiligen Füllichte angepasst. Die relativen Werte beziehen sich auf eine Füllichte von 0.5.

Bei einer Füllichte von 0.1 steigen die Temperaturen im Speicher (Abbildung 73) während dem Phasenübergang am schnellsten an. Bei einer niedrigen Füllichte kann mehr Wärme im HTF gespeichert werden, dadurch wird weniger Wärme im Phasenübergang gespeichert. In Abbildung 74 wird ersichtlich, dass aufgrund der hohen Leistung zu Beginn der Wärmeentnahme, bei niedrigen Füllichten, vor dem Phasenübergang am meisten Wärme entnommen werden kann.

Die höheren Leistungen (siehe Abbildung 75) nach dem Austritt des bereits warmen HTFs zeigen, dass die Wärmeübertragung bei hoher Füllichte grösser ist als bei kleiner.

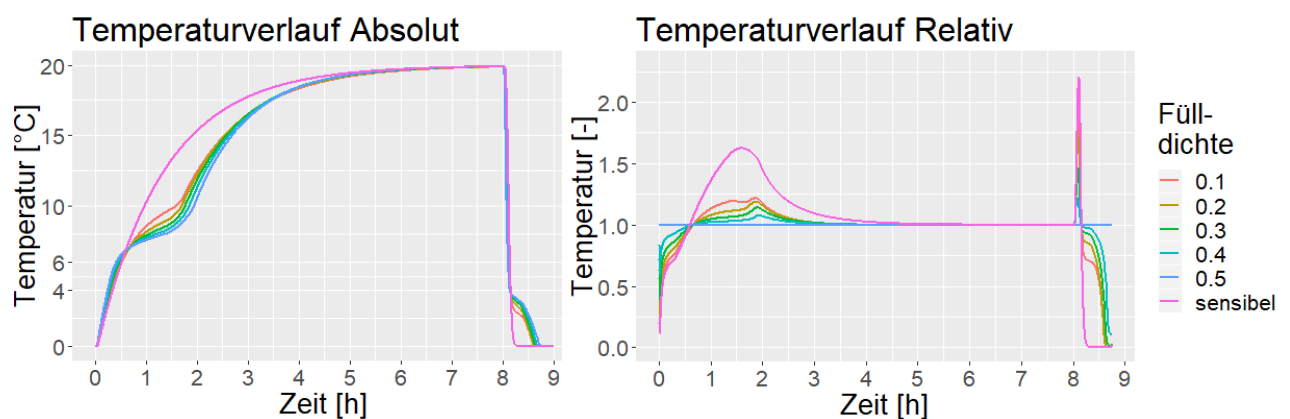


Abbildung 73: Temperaturverlauf von HTF bei einer Wärmekapazität im Speicher von ca. 25 MJ bei unterschiedlicher Füllichte und Schmelzwärme. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Füllichte von 0.5 dargestellt.

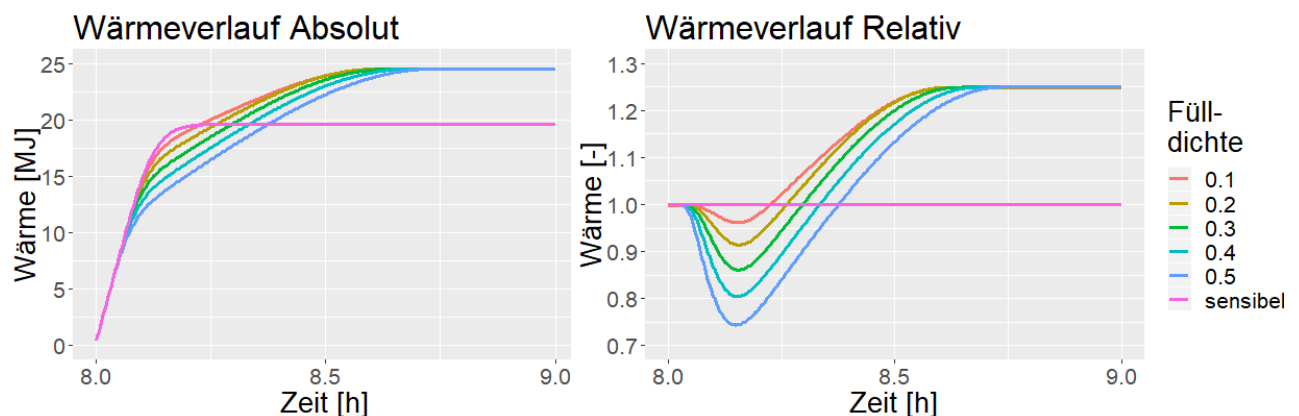


Abbildung 74: Wärmeverlauf von HTF bei einer Wärmekapazität im Speicher von ca. 25 MJ bei unterschiedlicher Füllichte und Schmelzwärme. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.

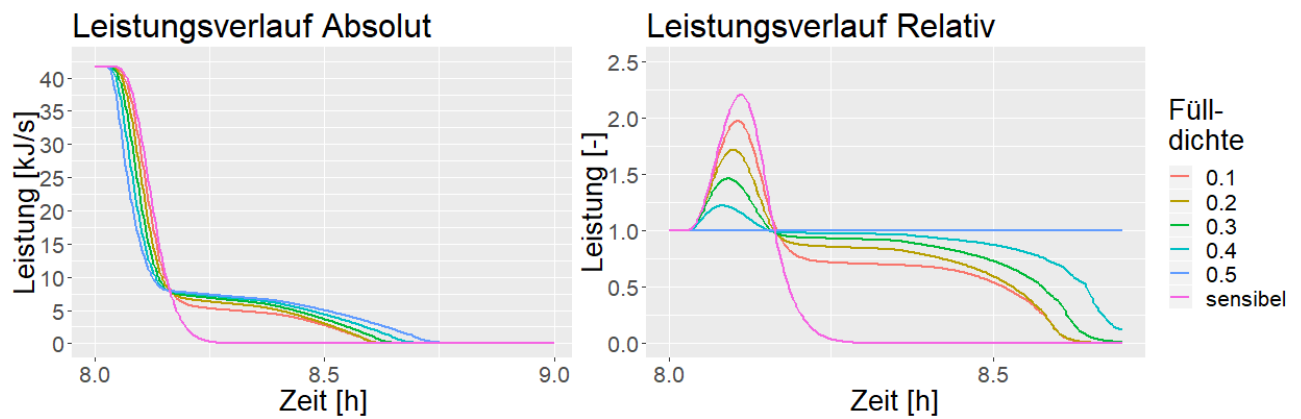


Abbildung 75: Leistungsverlauf von HTF bei einer Wärmekapazität im Speicher von ca. 25 MJ bei unterschiedlicher Füll-dichte und Schmelzwärme. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Füll-dichte von 0.5 dargestellt.

Auswertung Wärmekapazität

Wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, werden aus den minimalen und maximalen Wärmeverhältnissen die Verläufe aus den unterschiedlichen Parametern in Abbildung 76 dargestellt. Bei den Parameterbereichen der Dichte und der Schmelzwärme werden zu hohe Wärmekapazitäten im PCM-Speicher erreicht, wodurch die Verläufe in Abbildung 76 nicht kontinuierlich verlaufen. In beiden Fällen wird dadurch das minimale Wärmeverhältnis gegenüber der kleinsten Wärmekapazität um 8 % reduziert. Bei der Füll-dichte nimmt das minimale Wärmeverhältnis um 26 % ab, weil bei kleinen Füll-dichten mehr HTF im Speichervorhanden ist.

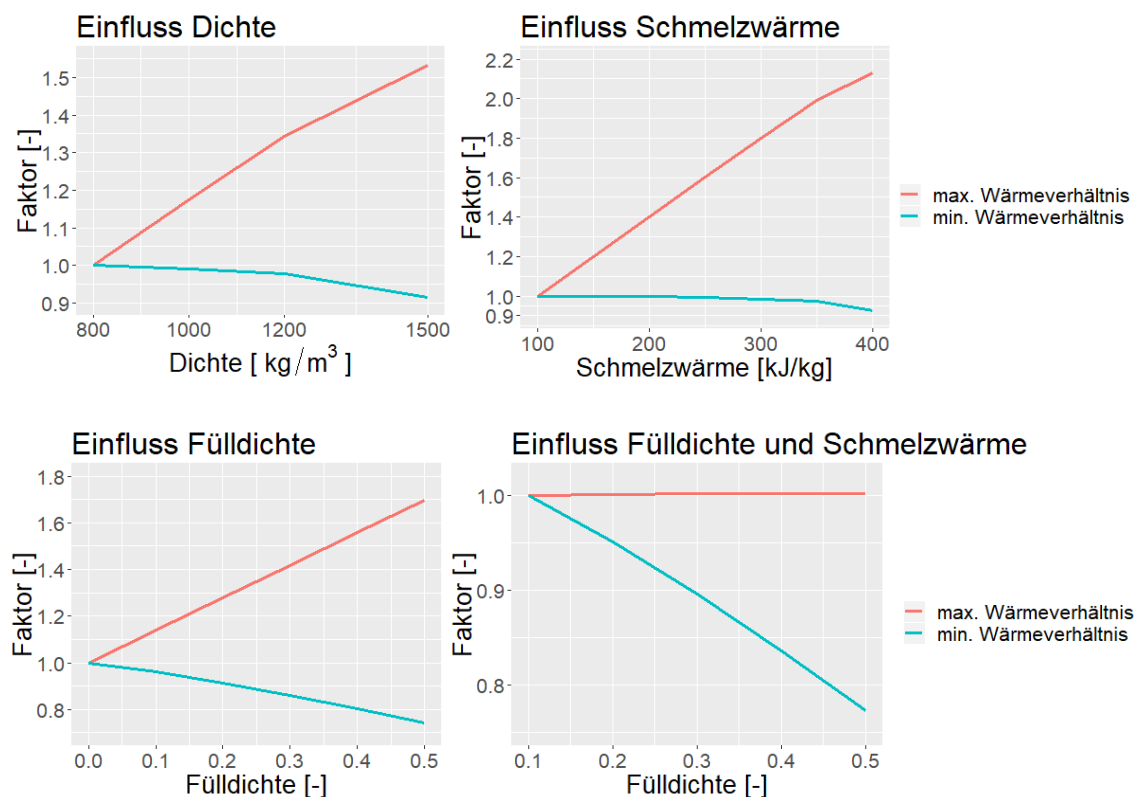


Abbildung 76: : Die maximalen und minimalen Wärmeverhältnisse aus dem «Wärmeverlauf Relativ».

Zeitliche Auswertung

Wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, wird die Zeitdauer bis die vorgegebenen Wärmemengen aus dem Speicher entnommen werden mit einander verglichen. Die unterschiedlichen Wärmekapazitäten wirken sich kaum auf die Zeit aus. Bei der Schmelzwärme und der Füllichte werden nicht alle Wärmemengen erreicht, daher sind diese Werte nicht dargestellt. Bei einer Dichte von 1200 kg/m^3 und bei einer Schmelzwärme von 350 kJ/kg werden grosse Wärmemengen am schnellsten bezogen, bei höheren Wärmekapazitäten, wird aufgrund der tieferen Temperatur im Speicher die Wärmeentnahme wieder verlängert. Bei der Füllichte können kleine Wärmemengen bei kleiner Füllichte schneller entnommen werden, bei steigender Wärmemenge verschiebt sich das zeitliche Minimum der Wärmeentnahme zu den höheren Füllichten.

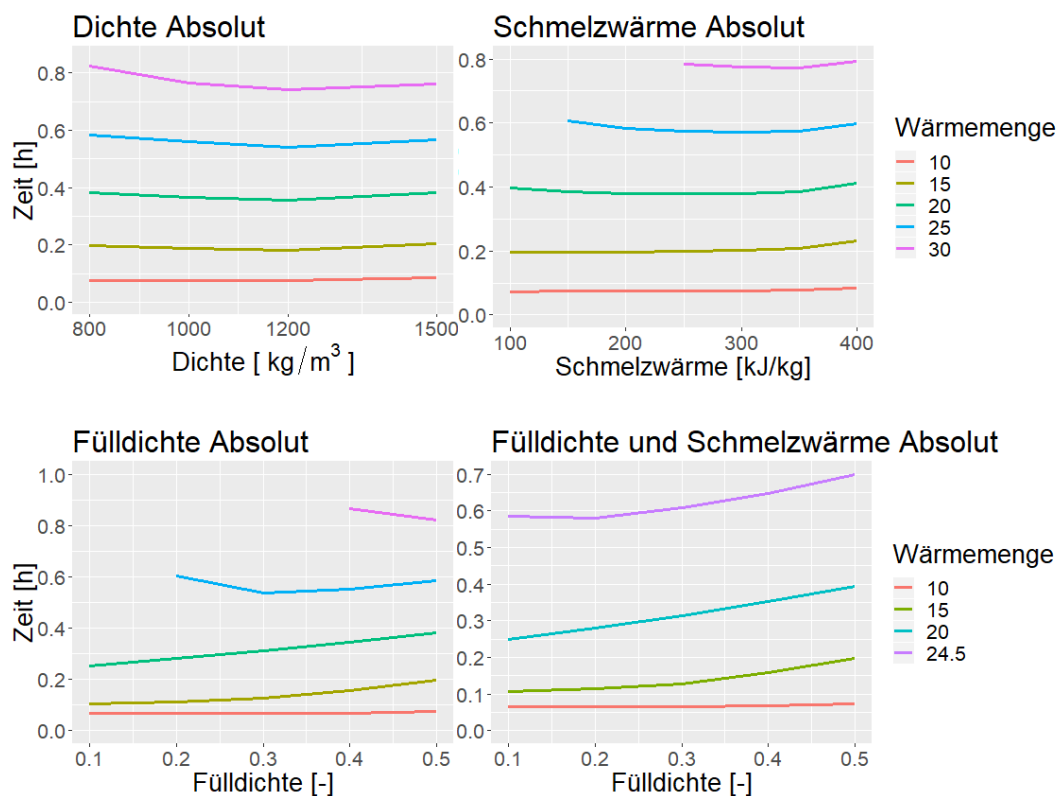


Abbildung 77: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Es werden die absoluten Werte der Parameter aus dem Kapitel Wärmekapazität dargestellt.

4.1.4 Temperaturniveau

Das Temperaturniveau im PCM-Speicher wird nebst den Lade- und Entladetemperaturen, durch den Schmelzbereich bestimmt. Der Schmelzbereich definiert in welchem Temperaturbereich sich die Temperatur im PCM-Speicher träge verhält. In diesem Kapitel wird die mittlere Temperatur zwischen Solidus- und Liquidus-Temperatur «Schmelztemperatur» und die Spannweite zwischen Solidus- und Liquidus-Temperatur «Schmelzspanne» genannt.

Schmelztemperatur

Bei der Schmelztemperatur wird eine Temperaturspanne von 2 °C berücksichtigt. Zur Untersuchung werden die Schmelzbereiche 0-2 °C, 5-7 °C, 11-13 °C, 17-19 °C unter den Standardbedingungen untersucht.

Aus Abbildung 78 bis Abbildung 80 wird Folgendes ersichtlich: Je tiefer der Schmelzbereich liegt, desto kürzer dauert der Phasenübergang. Durch den tiefen Schmelzbereich, entsteht ein grosser Temperaturunterschied zwischen der Ladetemperatur und der Temperatur im Speicher. Dadurch erhöht sich der Wärmeübergang, wodurch die Dauer vom Phasenübergang verkürzt wird. Dafür ist der Temperaturunterschied beim Entladen kleiner, wodurch das Entladen länger dauert. In der Regel wird ein grösserer Massenstrom beim Entladen gewählt, dadurch kann der Schmelzbereich näher bei der Entladetemperatur liegen.

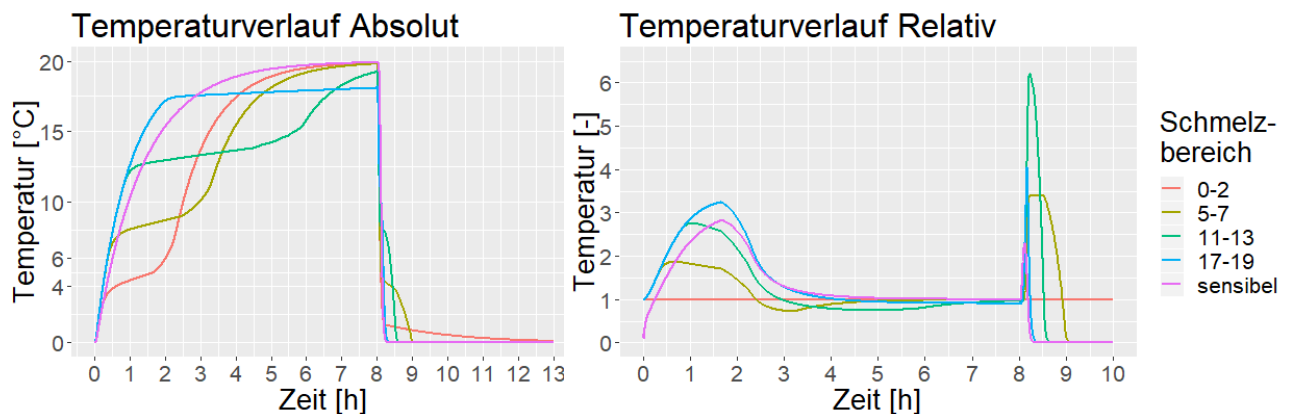


Abbildung 78: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 2 °C dargestellt.

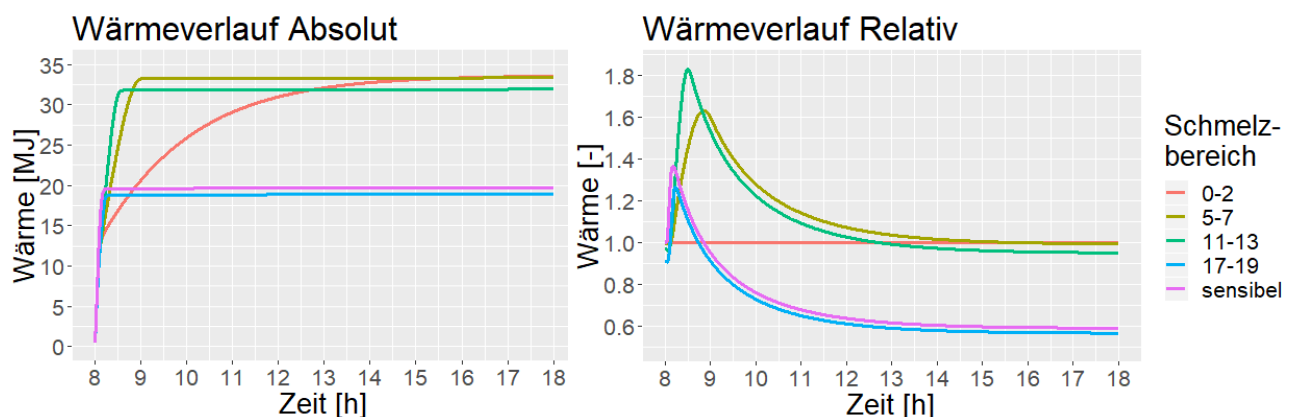


Abbildung 79: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 2 °C dargestellt.

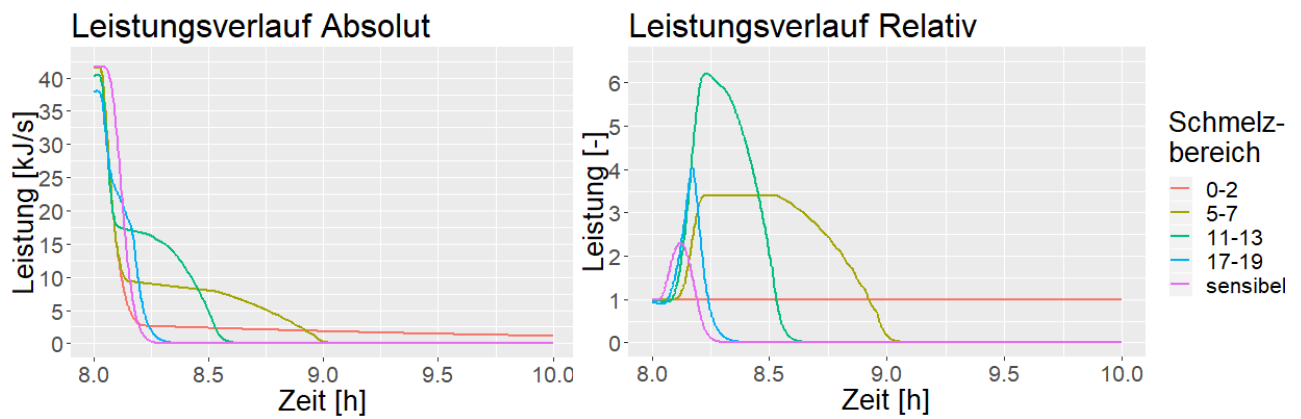


Abbildung 80: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 2 °C dargestellt.

In Abbildung 81 wird wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, die Zeitspanne bis die vorgegebenen Wärmemengen aus dem Speicher entnommen werden mit einander verglichen. Dabei werden die Schmelzbereiche als Schmelztemperaturen angegeben (dabei entspricht der Schmelzbereich 11-13 °C einer Schmelztemperatur von 12 °C). Bei einer Schmelztemperatur von 12 °C kann der Speicher zwar weniger stark geladen werden als bei tieferen Schmelztemperaturen, dafür kann die Wärme bis 30 MJ am schnellsten entnommen werden.

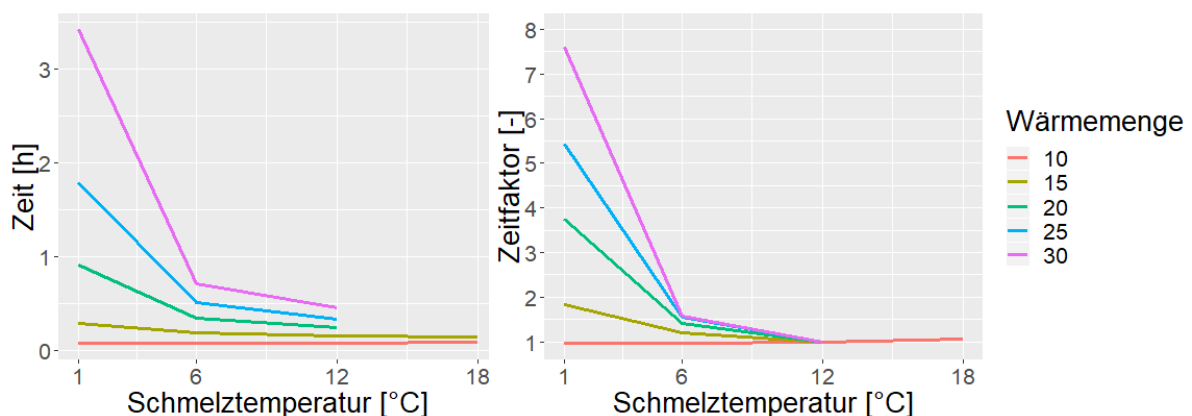


Abbildung 81: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Absolut (links) und relativ zu einer Schmelztemperatur von 12 °C (rechts).

Schmelzspanne

Es werden die folgenden Schmelzbereiche 9-11 °C, 6-14 °C, 3-17 °C, 0-20 °C unter den Standardbedingungen untersucht. Aus Abbildung 82 bis Abbildung 84 geht hervor, dass je grösser die Schmelzspanne, desto gleichmässiger verhält sich der Verlauf. Grundsätzlich werden bei grösseren Schmelzspannen höhere Temperaturen erreicht, da der Phasenübergang jedoch nicht abgeschlossen wird, werden diese mit weniger Wärme geladen. Beim Leistungsverlauf bildet sich bei kleinen Schmelzspannen eine Ebene, bei welcher eine Leistung beinahe konstant über eine bestimmte Zeit gehalten wird. Bei grossen Schmelzspannen wird der Leistungsabfall eher gleichmässig gebremst.

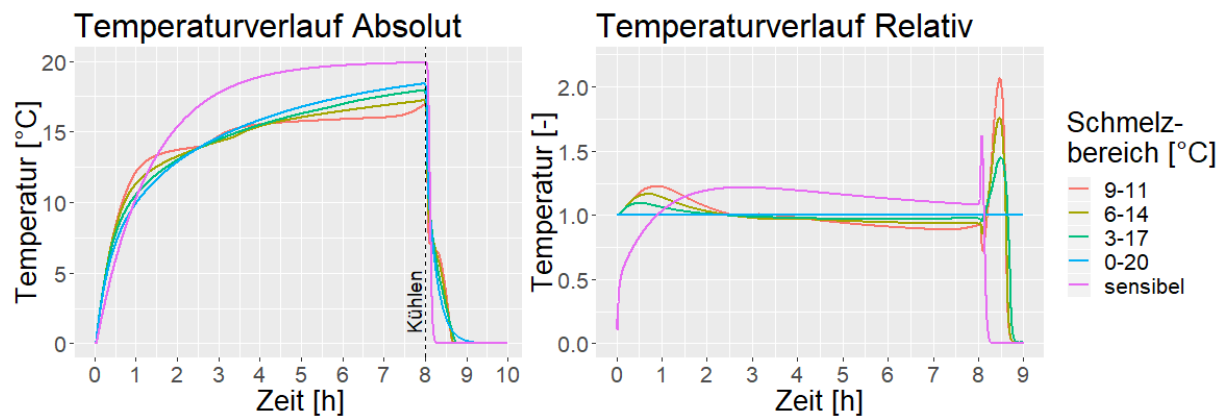


Abbildung 82: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelzspannen. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C dargestellt.

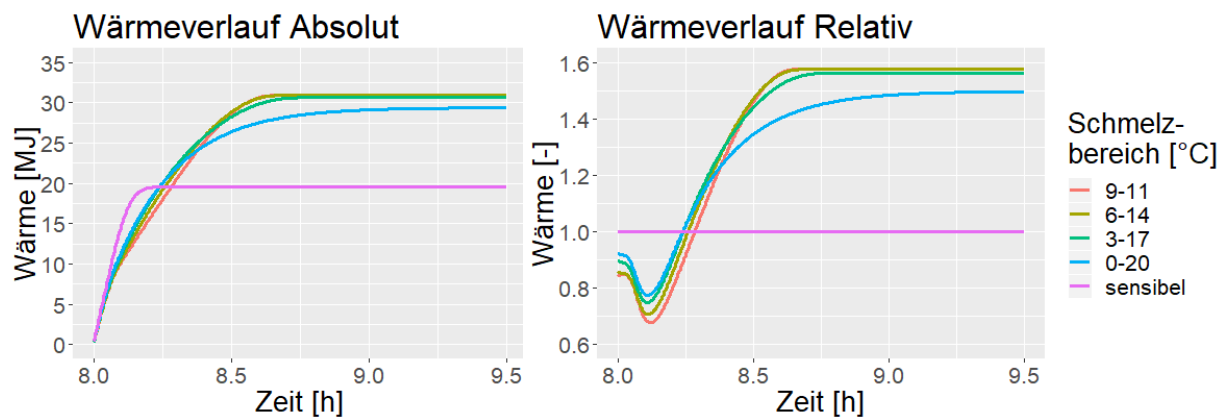


Abbildung 83: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelzspannen. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C dargestellt.

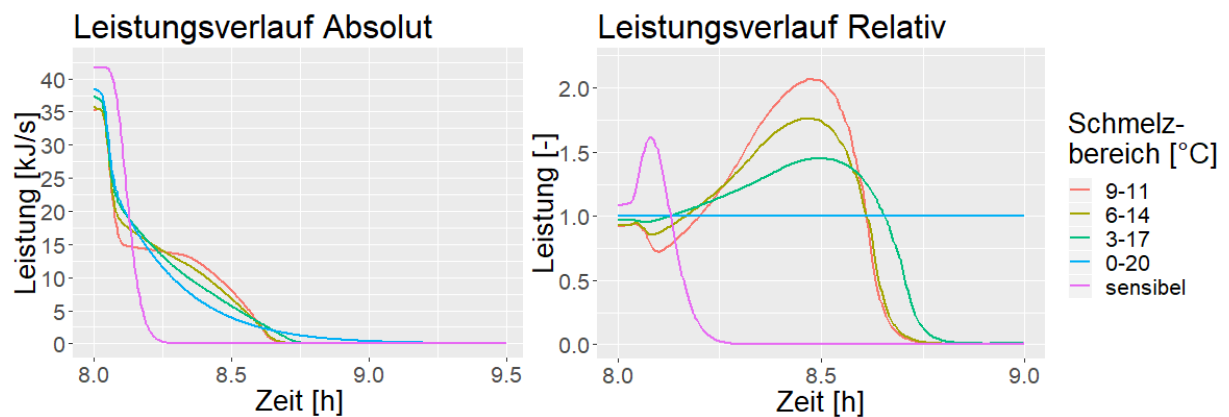


Abbildung 84: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelzspannen. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C dargestellt.

In Abbildung 85 wird wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, die Zeitspanne bis die vorgegebenen Wärmemengen aus dem Speicher entnommen werden mit einander verglichen. Dabei wird direkt die Grösse von der Schmelzspanne angegeben (dabei entspricht der Schmelzbereich 9-11 °C einer Schmelzspanne von 2 °C). In Abbildung 85 können kleine Wärmemengen bei grossen Schmelzspannen schneller entnommen werden, da die Temperatur langsamer gesenkt wird. Grosse Wärmemengen können bei kleinen Schmelzspannen schneller entnommen werden, weil diese stärker geladen werden und weil der komplette Phasenübergang bei höheren Temperaturen

abgeschlossen ist. Bei einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C ist zwischen 1 und 0 °C ca. 5 % der Wärme gespeichert, bei einem Schmelzbereich von 9 bis 11 °C ist zwischen 1 und 0 °C noch ca. 2 % der Wärme gespeichert.

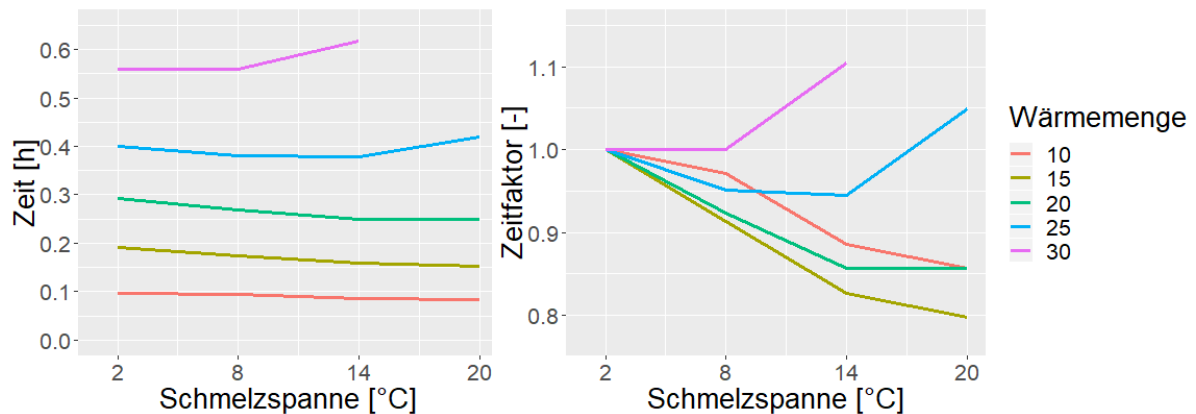


Abbildung 85: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Absolut (links) und relativ zu einer Schmelzspanne von 2 °C (rechts).

Lade- und Entladetemperatur

Wenn der Speicher mit 6 °C geladen und mit 4 °C entladen wird, unter Annahme der Standardparameter, können im PCM-Speicher und im sensiblen Speicher die folgenden Wärmemengen gespeichert werden.

PCM-Speicher:

$$c_{p_{HTF}} * (1 - \eta_{Füllichte}) * \Delta T + c_{p_{PCM_{fest}}} * \eta_{Füllichte} * \Delta T + \sigma_{PCM} * \eta_{Füllichte}$$

$$= 4.185 \frac{kJ}{kg * K} * 0.5 * 2 K + 2 \frac{kJ}{kg * K} * 0.5 * 2 K + 200 \frac{kJ}{kg} * 0.5 = 106.2 \frac{kJ}{kg}$$

Sensibler Speicher:

$$c_{p_{HTF}} * \Delta T = 4.185 \frac{kJ}{kg * K} * 2 K = 8.4 \frac{kJ}{kg}$$

Der PCM-Speicher kann aufgrund der tiefen Ladetemperatur jedoch nicht in acht Stunden vollständig geladen werden. Dazu sind der Wärmeübergang und die zugeführte Wärme zu niedrig. Der Wärmeübergang kann durch Erhöhen der Temperaturdifferenz zwischen Schmelzbereich und Ladetemperatur erhöht werden. Bei höheren Ladetemperaturen wird das Verhältnis der Wärmekapazität vom PCM-Speicher zum sensiblen Speicher verkleinert. Die Temperaturspanne zwischen der Lade- und Entladetemperatur ist somit ausschlaggebend für das Verhältnis zwischen der speicherbaren Wärme im PCM-Speicher und im sensiblen Speicher. Zur Untersuchung des Einflusses der Ladetemperatur auf das Speicherverhalten werden ein PCM-Speicher und ein sensibler Speicher bei den Standardparametern mit unterschiedlichen Ladetemperaturen (Entladetemperaturen bleiben immer 0 °C) simuliert. Die Auswertung erfolgt über das Verhältnis der entziehbaren Wärmemenge zwischen PCM-Speicher und sensiblem Speicher.

Der Temperaturverlauf in Abbildung 86 veranschaulicht, dass bei steigender Ladetemperatur die Dauer des Phasenübergangs verkürzt wird. Der Wärmeverlauf in Abbildung 86 zeigt, dass abhängig von den Ladetemperaturen das Verhältnis zwischen der entziehbaren Wärme eines PCM-Speichers und einem sensiblen Speicher ändert.

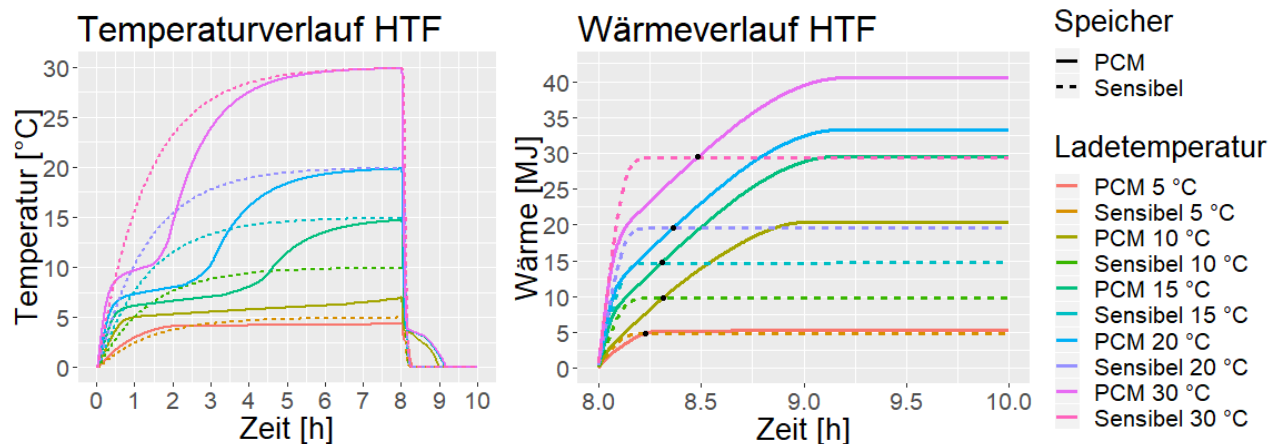


Abbildung 86: Temperatur- und Wärmeverlauf bei unterschiedlichen Ladetemperaturen von PCM- und sensiblem Speicher. Die schwarzen Punkte in «Wärmeverlauf HTF» kennzeichnen die Schnittstelle, bei welcher der Wärmeverlauf vom PCM-Speicher den Wärmeverlauf vom sensiblen Speicher schneidet.

Aus Abbildung 87 wird ersichtlich, dass bei einer Ladetemperatur von 12 °C der PCM-Speicher ca. 2.2 Mal so viel Wärme wie ein sensibler Speicher speichern kann. Bei einer Ladetemperatur von 20 °C kann der PCM-Speicher nur noch ca. das 1.7-Fache des sensiblen Speichers speichern. Bei einer Ladetemperatur zwischen ca. 5 °C und ca. 60 °C kann, unter Berücksichtigung der Standardparameter, im PCM-Speicher mehr Wärme gespeichert werden als im sensiblen Speicher.

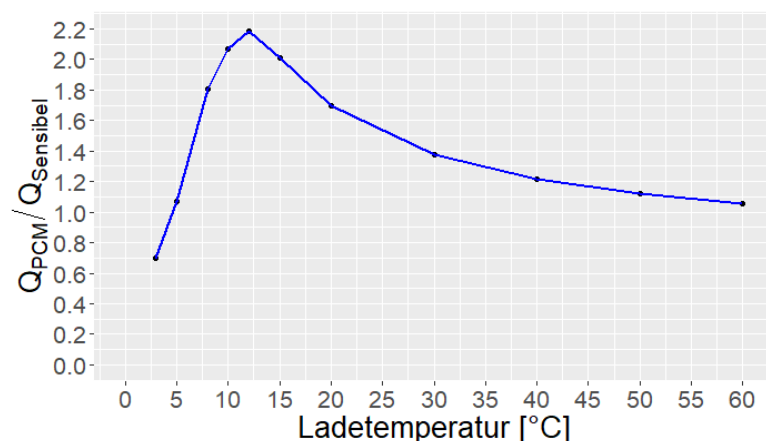


Abbildung 87: Verhältnis zwischen entziehbarer Wärme vom PCM-Speicher zum sensiblen Speicher bei unterschiedlichen Ladetemperaturen [°C].

4.2 Wärmepumpensystem

Es wird ausgewertet, wie sich ein PCM-Speicher auf ein Wärmepumpensystem auswirkt. Dabei können nur anhand der Temperaturen die COP-Werte ermittelt werden. Für eine Auswertung der Wärme muss der Speicher in einem Wärmepumpensystem simuliert werden, wobei die Entladetemperatur abhängig von der Austrittstemperatur aus dem Speicher ist.

4.2.1 Zuweisung des COPs

Zur Auswertung werden die Werte der Simulationen im Kapitel 4.1 verwendet, wobei die Wärmepumpe den Speicher bei konstantem Massenstrom mit einer Entladetemperatur von 0 °C kühlt. In der Auswertung wird jeder berechneten Temperatur der neunten Schicht ein COP aus Abbildung 88 zugewiesen. Der Verlauf der COP-Kurve wird durch zwei Geraden nachgebildet, da die Daten der Kurve nicht öffentlich verfügbar sind. Damit der durchschnittliche COP nicht durch das Annähern der Speichertemperaturen an null verzerrt wird, werden nur Temperaturen ≥ 0.1 betrachtet.

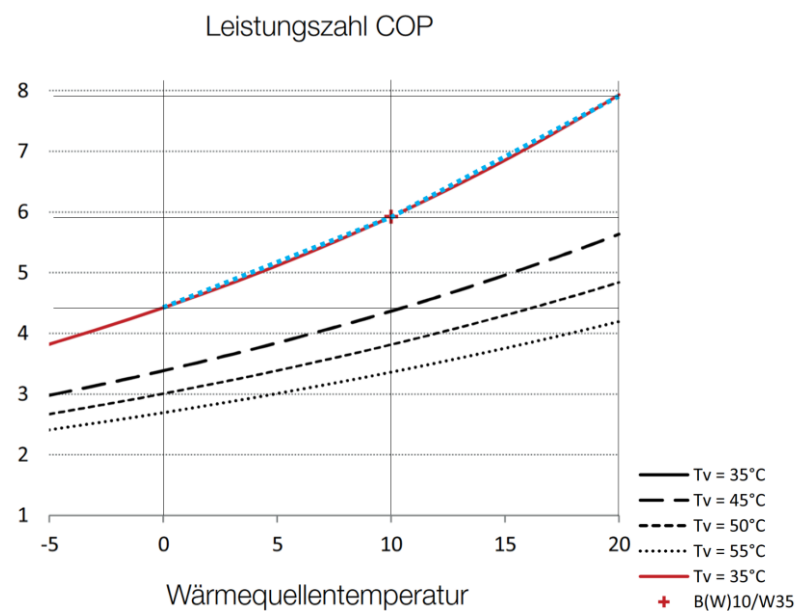


Abbildung 88: COP-Werte bei unterschiedlichen Temperaturen einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe von (CTA, 2014). Weil die Daten der Kurven nicht vorhanden sind, wird die Kurve $T_v=35\text{ °C}$ durch zwei Geraden (blau gestrichelte Linien) zwischen den Punkten ($T=0\text{ °C}$ | $COP=4.3$), ($T=10\text{ °C}$ | $COP=5.9$), ($T=20\text{ °C}$ | $COP=7.9$) nachgebildet. Durch diese Geraden werden die COP-Werte bei den unterschiedlichen Temperaturen interpoliert.

4.2.2 COP Vergleiche

Die Parameter, die die Leistung verbessern, führen zu einem höheren COP. Zur Veranschaulichung wie stark sich der COP in unterschiedlichen Parameterbereichen verändert, werden jeweils die grössten und kleinsten Werte der untersuchten Parameter dargestellt.

Der sensible Speicher weist mit 6.06 den höchsten COP auf (siehe Abbildung 89 links). Bereits bei einer Füllichte von 0.1 wird der COP stark gesenkt (siehe Abbildung 89 rechts).

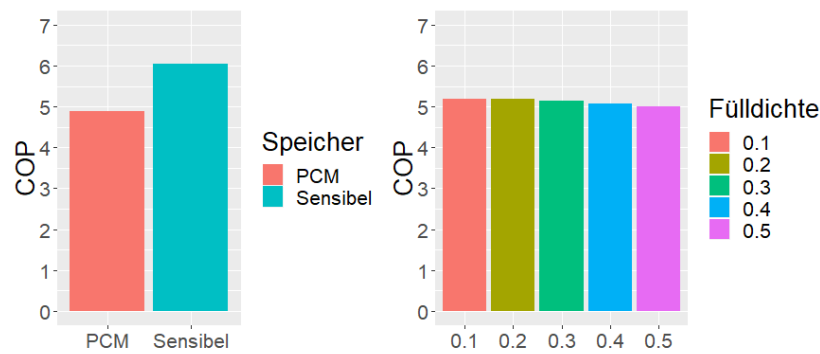


Abbildung 89: Mittlere COP-Werte vom Standard PCM-Speicher und dem sensiblen Speicher (links) und ein PCM-Speicher mit unterschiedlichen Füllmengen bei einer Wärmekapazität von 25 MJ (rechts)

In Abbildung 90 wird ersichtlich, dass Parameter, die den Wärmeübergang erhöhen (kleinerer Radius, grössere Wärmeleitfähigkeit) auch zu einem höheren COP führen.

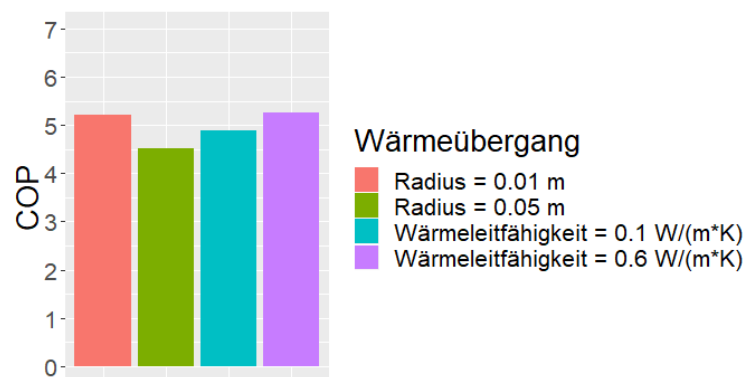


Abbildung 90: Mittlere COP-Werte bei den untersuchten Parametern beim Wärmeübergang.

In Abbildung 91 wird ersichtlich, dass Parameter, die die Wärmekapazität erhöhen (höhere Dichte, grössere Schmelzwärme) den COP senken.

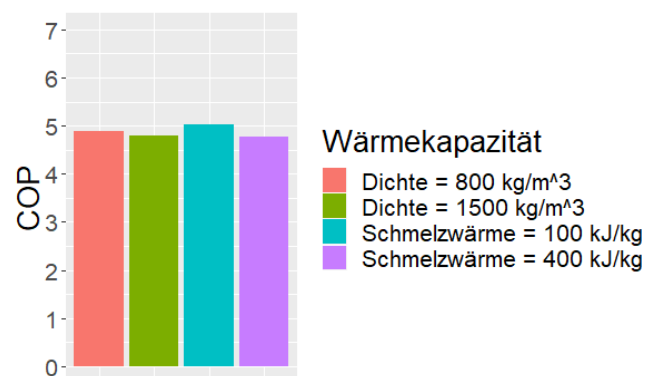


Abbildung 91: Mittlere COP-Werte bei den untersuchten Parametern der Wärmekapazität

In Abbildung 92 wird ersichtlich, dass der COP mit zunehmender Ladetemperatur im PCM-Speicher nur gering im Vergleich zum sensiblen Speicher ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der grösste Teil der entnommenen Wärme bei Temperaturen unter dem Phasenübergang ausfliesst.

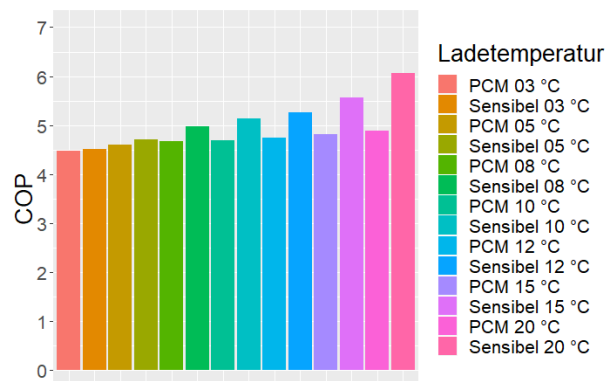


Abbildung 92: Mittlere COP-Werte bei unterschiedlichen Ladetemperaturen.

In Abbildung 93 wird ersichtlich, dass eine Erhöhung des Schmelzbereiches zu einem höheren COP führt. Der höchste COP wird bei einem Schmelzbereich zwischen 12 und 14 °C erreicht. Damit durch den höheren COP auch mehr Wärme produziert werden kann, muss der PCM-Speicher bei hohen Schmelzbereichen geladen werden können.

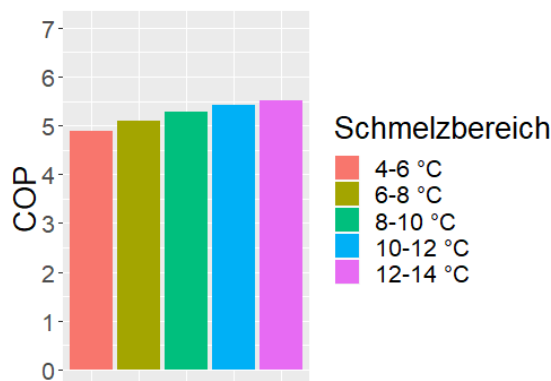


Abbildung 93: Mittlere COP-Werte bei unterschiedlichen Schmelzbereichen.

4.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Im Kapitel 4.1 wurden die Gründe für die unterschiedlichen Speicherverhalten bei Veränderung der Parameterwerte genau beschrieben. Die daraus gewonnen Erkenntnisse werden zu allgemeingültigen Aussagen zusammengefasst.

Der Wärmeübergang zwischen PCM und HTF kann durch folgende Veränderungen erhöht werden:

- Erhöhen der Wärmeleitfähigkeit
- Verkleinern der PCM-Radien
- Erhöhen des Massenstromes

Ein hoher Wärmeübergang verbessert das Lade- und Entladeverhalten in jedem Fall. Die HTF-Temperatur im PCM-Speicher weist einen kleineren Temperaturunterschied zum PCM auf, wodurch sich die Temperatur im HTF bis nach dem Phasenübergang langsamer erhöht als bei einem tieferen Wärmeübergang. Dadurch ergibt sich ein grösserer Temperaturunterschied

zwischen der Ladetemperatur und dem HTF im Speicher, wodurch dem Speicher mehr Wärme zugeführt wird. Dazu kann die Wärme bei einem hohen Wärmeübergang schneller entnommen werden als bei einem tiefen Wärmeübergang.

Die Wärmekapazität kann durch folgende Punkte erhöht werden:

- Erhöhen der PCM-Dichte
- Erhöhen der Schmelzwärme
- Erhöhen der Füllichte

Eine Erhöhung der Wärmekapazität hat zur Folge, dass insgesamt mehr Wärme gespeichert wird und diese bei höherer Leistung bezogen werden kann, weil die Temperatur des HTFs beim Entladen langsamer sinkt. Wenn die Wärmekapazität zu hoch ist und der Speicher nicht vollständig geladen werden kann, wird die entziehbare Leistung reduziert. Die Reduzierung der Leistung erfolgt durch die tieferen Temperaturen im Speicher. Trotzdem wird insgesamt mehr Wärme gespeichert, weil der Temperaturunterschied zwischen der Ladetemperatur und dem HTF im Speicher während dem Laden grösser ist.

Über die Füllichte kann definiert werden, wie viel Wärme bei hoher Leistung entnommen werden kann und wie hoch die Leistung während dem Phasenübergang vom PCM ist. Bei niedriger Füllichte kann mehr Wärme bei hoher Leistung bezogen werden, da mehr vorgewärmtes HTF im Speicher vorliegt. Die Leistung während des Phasenübergangs des PCMs wird bei hoher Füllichte aufgrund der höheren Wärmeübertragungsfläche erhöht.

Die Temperaturbereiche beeinflussen das Speicherverhalten wie folgt:

- Bei Schmelztemperaturen nahe der Entladetemperatur wird der PCM-Speicher schneller geladen aber langsamer entladen.
- Der Schmelzbereich legt fest, bei welchen Temperaturen sich der PCM-Speicher träge verhält. Grundsätzlich gilt je kleiner die Schmelzspanne, desto träger verhält sich der PCM-Speicher in diesem Temperaturbereich.
- Die Lade- und Entladetemperaturen bestimmen wie viel mehr Wärme in einem PCM-Speicher gegenüber einem sensiblen Speicher gespeichert werden kann. Je grösser der Temperaturunterschied zwischen dem Laden und dem Entladen, desto schneller der Lade- oder Entladevorgang und desto tiefer das Verhältnis der Wärmekapazität zwischen dem PCM-Speicher und dem sensiblen Speicher.

Die Lade- und Entladetemperaturen werden durch die äusseren Bedingungen und das Wärmesystem vorgegeben, an diese müssen die PCM-Parameter angepasst werden.

Aus den vielen Parameteruntersuchungen wird ersichtlich, dass das Speicherverhalten durch verbesserte PCM-Eigenschaften nur geringfügig verbessert wird. Zum Beispiel wirkt sich eine noch

höhere Wärmeleitfähigkeit kaum auf das Speicherverhalten aus (siehe Kapitel 4.1.2), noch höhere Wärmekapazitäten führen dazu, dass der Speicher nicht vollständig geladen werden kann (siehe Kapitel 4.1.3). Abbildung 89 bis Abbildung 93 im Kapitel 4.2.2 veranschaulichen, dass die richtige Wahl des Schmelzbereiches den COP stärker erhöht als verbesserte PCM-Eigenschaften.

In Abbildung 87 im Kapitel 4.1.4 wird dargestellt, dass im PCM-Speicher bei einer Ladetemperatur von 12 °C mit einer Schmelzwärme von 200 kJ/kg die 2.2-Fache Wärmemenge eines sensiblen Speichers gespeichert werden kann. Diese Erhöhung wird in Abbildung 63 im Kapitel 4.1.3 bei einer Schmelzwärme von 300 kJ/kg bei 20 °C erreicht. Daraus lässt sich schliessen, dass die richtige Auslegung des Temperaturniveaus auch bei der Auslegung der Wärmekapazität berücksichtigt werden soll.

Diese Arbeit soll aufzeigen, wie wichtig die richtige Parameterwahl ist. Dazu wurden die einzelnen Parameter untersucht und deren Auswirkung auf das Speicherverhalten aufgezeigt. Diese Erkenntnisse sollen bei Vorüberlegungen und Anpassungen der Speicherauslegung helfen. Wenn der PCM-Speicher richtig auf das Wärmesystem ausgelegt wird, kann der Speicher effizienter genutzt werden. Dafür ist eine Simulation des PCM-Speichers im Wärmesystem sehr wichtig.

5 Diskussion

5.1 Validierung des Modells

Die Aussagen aus dem Modell stimmen mit den Aussagen aus der Literatur überein und sind auch physikalisch plausibel. Damit die Speicherleistungen effektiv ausgewertet werden können, muss das Modell mit Messergebnissen validiert werden. Gerade die Wärmeübergangszahl wird im jetzigen Modell zu wenig realistisch nachgebildet, weil das Schmelzverhalten in der PCM-Kugel nicht berücksichtigt wird und die freie Konvektion nicht als Strömung berücksichtigt wird. Ohne Messungen ist unklar, wie stark diese Faktoren das Speicherverhalten beeinflussen. Durch eine Messung könnte im Idealfall das Modell mit einem Parameter angepasst werden.

5.2 Modell mit Solver

Das Modell wurde einfachheitshalber mit Schleifen und Bedingungen aufgebaut. Dadurch wird das Modell sehr rechenaufwendig und es können keine langfristigen Simulationen modelliert werden. Bei Parametern, welche hohe Temperaturänderungen bewirken wie hoher Massenstrom, hohe Temperaturunterschiede, hohe Wärmeleitfähigkeit, kleine Radien usw., entstehen Schwankungen in den Verläufen. Die Schwankungen entstehen, weil im konstant betrachteten Zeitschritt zu hohe oder zu tiefe Temperaturen berechnet werden, wodurch dieses Verhalten im nächsten Zeitschritt korrigiert wird. Bei steigenden Zeitschritten nähern sich die Temperaturen im Speicher der Temperatur des zugeführten HTFs schneller an. Wenn die Simulationen mit Zeitschritten von 1 s statt 10 s durchgeführt werden, werden tiefere Temperaturen nach der Ladezeit erreicht.

Durch Solver und Vektoren kann die Rechengeschwindigkeit und die Genauigkeit des Modells erhöht werden. Wodurch korrekte Simulationen über ein ganzes Jahr bei angemessener Rechenzeit durchgeführt werden können. Dies ist von grossem Vorteil für die Auslegung des PCM-Speichers, weil dadurch Aussagen über das jährliche Einsparpotential gemacht werden können.

5.3 Betrachtete PCM-Speicherausführung

In der betrachteten PCM-Speicherausführung kann die Wärme beinahe so schnell wie bei einem sensiblen Speicher entnommen werden, weil der Speicher vom Wärmekreislauf und Kühlkreislauf durchflossen wird. Damit dies durchgeführt werden kann, muss sichergestellt sein, dass im Wärmekreislauf und im Kühlkreislauf dasselbe HTF verwendet wird. In der Regel werden aufgrund der unterschiedlichen Temperaturbereiche unterschiedliche HTFs verwendet. Wenn im Speicher die Wärmezufuhr und -entnahme über geschlossene Kreisläufe, wie z.B. einen Wärmetauscher ausgeführt wird, fällt der Wärmeaustausch um ein Vielfaches geringer aus, da nur freie Konvektion im Speicher vorliegt. In diesem Fall sollte im Speicher eine Strömung angebracht werden, um den

Wärmeaustausch zwischen HTF und PCM zu erhöhen. Die zusätzliche Wärmekapazität des PCM-Speichers kann nur genutzt werden, wenn der Wärmefluss vom und zum PCM genügend gross ist.

5.4 Wärmepumpensystem

Zur Entscheidung in welchen Fällen ein PCM-Speicher anstelle eines sensiblen Speichers in einem Wärmepumpensystem eingesetzt werden soll ist der Betrieb der Wärmepumpe von grosser Bedeutung. Dazu werden zwei mögliche Wärmepumpenbetriebe mit nachfolgendem Wärmespeicher beschrieben.

1. Die Wärmepumpe wird aufgrund des Niedertarifs nur nachts eingesetzt. In diesem Fall wird der kalte Speicher tagsüber zum Beispiel mit Solarthermie geladen und nachts durch die Wärmepumpe entladen. Wenn in diesem Fall der PCM-Speicher und der sensible Speicher dasselbe Volumen aufweisen, dann schneidet der PCM-Speicher aufgrund der höheren Wärmekapazität besser ab. Falls jedoch genügend Platz für einen grösseren sensiblen Speicher zur Verfügung steht, kann die Vergrösserung des Speichervolumens kostengünstiger als das PCM-Material ausfallen. Wenn ein grösserer sensibler Speicher verwendet wird, kann die Heizwärme bei einem höheren COP produziert werden, wodurch der sensible Speicher effizienter ist.

In diesem Fall sind die Kosten vom PCM und der Platzbedarf ausschlaggebend für die Speicherwahl.

2. Die Wärmepumpe produziert bei vorhandener Einstrahlung Wärme, damit der Eigenverbrauch von vorhandenen PVT-Modulen erhöht wird. In diesem Fall soll in dem kalten Speicher möglichst schnell, hohe Temperaturen erreicht werden, damit diese möglichst direkt aus dem PVT-Modul verwendet werden können. Dabei würde der PCM-Speicher das Wärmepumpensystem aufgrund des trägen Speicherverhaltens limitieren. Sobald ein trägeres Verhalten gewünscht wird, weil im kalten Speicher die Wärme für mehrere Tage gespeichert werden muss ist in einem solchen Wärmepumpensystem ein PCM-Speicher zu bevorzugen, da dieser bei Temperaturen über dem Schmelzbereich bei gleichem Ladeverhalten mehr Wärme aufnehmen kann als ein sensibler Speicher.

In diesem Fall sind klimatische Bedingungen ausschlaggebend für die Speicherwahl.

5.5 Vergleich des PCM-Speichers und des sensibler Speichers

Ein PCM-Speicher unterscheidet sich von einem sensiblen Speicher durch das PCM im Speicher, durch welches das HTF-Volumen verkleinert wird. Das PCM vergrössert die Wärmekapazität und reduziert die Leistung des Speichers. Bei kleinen Speichern stellt sich dabei die Frage, ob für die höhere Wärmekapazität eine geringere Leistung in Kauf genommen werden kann. Wenn viel Platz

vorhanden ist, um Wärme für mehrere Tage zu speichern, kann die reduzierte Leistung von PCM-Speicher durch eine grosse HTF-Menge im Speicher oder einen nachfolgenden Speicher ausgeglichen werden.

Zur definitiven Entscheidung, ob sich ein PCM-Speicher gegenüber einem sensiblen Speicher eignet, müssen noch folgende Fragen geklärt werden:

- Verhält sich der PCM-Speicher in der Realität gleich wie in der Simulation?
- Bleibt die Schmelzwärme über die Nutzungsdauer des Speichers erhalten (Zyklusstabilität)?
- In welchem Wärmesystem wird der Speicher eingesetzt?
- Ist genügend Platz für einen grösseren sensiblen Speicher vorhanden?
- Können die Materialkosten des PCMs durch die Einsparung der Energiekosten kompensiert werden?
- Wird mehr Energie für die Herstellung von PCM benötigt, als eingespart werden kann?
- Sind die verwendeten PCMs umweltverträglich?

5.6 Weiteres Vorgehen

Zum Überprüfen in welchen Fällen und bei welchen Parametern sich der Einsatz eines PCM-Speichers eignet, sollte ein Modell mit Solver erstellt werden, welches in Simulationsprogrammen eingebunden werden kann. Anschliessend sollte dieses Modell validiert werden, damit realitätsnahe Simulationen durchgeführt werden können.

6 Literaturverzeichnis

- BFE, B. für E. (2017, Oktober). Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2016 nach Verwendungszwecken. Abgerufen von http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/02167/index.html?lang=de&dossier_id=02169
- Böckh, P. von, & Wetzel, T. (2011a). Ein kleiner Körper taucht in ein Fluid grosser Masse. In *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis* (4., bearb. Aufl). Berlin: Springer.
- Böckh, P. von, & Wetzel, T. (2011b). Ein kleiner Körper taucht in ein Fluid vergleichbarer Masse. In *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis* (4., bearb. Aufl). Berlin: Springer.
- CTA. (2014). Leistungskurven, Optiheat OH 1-5es. Abgerufen von https://www.cta.ch/de-ch/waerme/wasser-wasser/1207/1979/?oid=1957&lang=de&root=&pfad=https://produkte.cta.ch/cust/includes/user/files/waermepumpe/leistungskurve/LK_WW_OH%201-5es.pdf
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2010). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Wiley.
- Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. B., Lassue, S., & Zalewski, L. (2011). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 112–130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.011>
- ENDK. (2014, August 28). Energieverbrauch von Gebäuden. Abgerufen 26. Juli 2018, von <https://www.endk.ch/de/ablage/endk-1/20140828-factsheet.pdf>
- Kerskes, H., Druck, H., & Muller-Steinhagen, H. (2006). Verbesserte Speicherkonzepte für solare Gebäude und Niedrigenergie-Häuser, 6.
- Kunkel, S., Kübel-Heising, F., Dörnhofer, P., Medina, I., Weis, J., Stabler, R., ... Rädle, M. (2017). Direktkontakt-Latentwärmespeicher zur Effizienzsteigerung von Wärmepumpen. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(1–2), 237–240. <https://doi.org/10.1002/cite.201700047>
- Leonhardt, C. (2016). Thermische Speicher mit Phasenwechselmaterialien im Heizsystem, 162.

- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction into Basics and Applications*. Berlin, Heidelberg, GERMANY: Springer. Abgerufen von <http://ebookcentral.proquest.com/lib/zhaw/detail.action?docID=364087>
- Mertens, K. (2015). *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis* (3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag.
- Peng, H., Dong, H., & Ling, X. (2014). Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed. *Energy Conversion and Management*, 81, 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.052>
- Phase Change Material Data Sheets | PCM Product Details. (o. J.). Abgerufen 24. August 2018, von <https://phasechange.com/technology/data-sheets/>
- PLUSS – PCM Range. (o. J.). Abgerufen 24. August 2018, von <http://www.pluss.co.in/product-range-PCM.php>
- Regin, A. F., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438–2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
- Rohrer, J. (2018). L-Sol. Abgerufen 6. Januar 2019, von <https://www.zhaw.ch/de/lsfm/institute-zentren/iunr/oekotechnologien-und-energiesysteme/erneuerbare-energien/solarenergie/l-sol/>
- Rubitherm. (2018). Erläuterungen zu Unterkühlung, Hysterese und weiteren Eigenschaften der SP-Produktreihe.
- Rumble, J. (2018). *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 99th Edition* (99th edition). Taylor & Francis Ltd.
- Specht, E. (2018, Juni 21). The best known packings of equal circles in a circle. Abgerufen 16. Oktober 2018, von <http://hydra.nat.uni-magdeburg.de/packing/cci/#Download>

Stadler, I., & Hauer, A. (2017). Thermische Energiespeicher. In *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration* (S. 579–618). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5_10

Verein Deutscher Ingenieure, & Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.). (2013). Wärmeübertragung Partikel – Fluid in durchströmten Haufwerken. In *VDI-Wärmeatlas: mit 320 Tabellen* (11., bearb. und erw. Aufl). Berlin: Springer Vieweg.

Wolfgang, S. (2005). Inventory of Phase Change Materials (PCM), 33.

Yanbing, K., Yinping, Z., Yi, J., & Yingxin, Z. (1999). A General Model for Analyzing the Thermal Characteristics of a Class of Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 121(4), 185. <https://doi.org/10.1115/1.2888165>

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften von A16 (aus Datenblatt in Anhang 2), einem organischen PCM mit einem Schmelzbereich von 16 bis 18 °C, und Wasser (Rumble, 2018).....	11
Tabelle 2 Bio PCM («Phase Change Material Data Sheets PCM Product Details», o. J.).....	101
Tabelle 3 savE PCM («PLUS – PCM Range», o. J.)	101
Tabelle 4 Rubitherm PCM («PLUS – PCM Range», o. J.).....	101

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Speicherbare, spezifische Wärme [kJ/kg] bezogen auf 0 °C in Funktion der Temperatur [°C] des Mediums.....	12
Abbildung 2: Darstellung von Hysterese und Unterkühlung (Stadler & Hauer, 2017).....	13
Abbildung 3: Wärmeaustauschmöglichkeiten: Über die Oberfläche des PCM's (links), über interne Oberflächen (Mitte), über PCM im Wärmetransportfluid (rechts) (Mehling & Cabeza, 2008).	14
Abbildung 4: Wärmeübertragung über die Oberfläche (Mehling & Cabeza, 2008). Das PCM liegt jeweils im Speicher (storage) vor. Die Wärme wird passiv aufgrund des Temperaturunterschieds mit der Nachfrageseite (demand) ausgetauscht.	15
Abbildung 5: Verschiedene Wärmetauscherkonzepte (Mehling & Cabeza, 2008).....	15
Abbildung 6: Wärmetauscherkonzept (links), Leistungsverlauf (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt den Leistungsverlauf eines sensiblen Speichers (Mehling & Cabeza, 2008).	16
Abbildung 7: Mögliche interne Wärmeleitstrukturen (Stadler & Hauer, 2017).....	16
Abbildung 8: Direktkontaktkonzept mit Leistungsverlauf (Mehling & Cabeza, 2008).....	17
Abbildung 9: Modulausführung mit Leistungsverlauf (Mehling & Cabeza, 2008).....	18
Abbildung 10: Beispiele für verschiedene Verkapselungsformen (Stadler & Hauer, 2017).	18
Abbildung 11: Suspension (Slurry) mit Leistungsverlauf (Mehling & Cabeza, 2008).	19
Abbildung 12: Prinzipschema des L-Sol Systems (Rohrer, 2018).....	20
Abbildung 13: Schematische Darstellung des PCM-Speichers.	24
Abbildung 14: Darstellung einer Kugelschicht. In einer Kugelschicht wird die Füllichte über das Volumen aller darin enthaltenen Kugeln und dem Speichervolumen bei dieser Höhe berechnet.	24
Abbildung 15: Maximale Anzahl Kugeln bei unterschiedlichen Radiusverhältnissen zwischen Speicher und PCM- Kugel (Specht, 2018).....	24
Abbildung 16: Verlauf der maximalen Füllichte (links) und der Oberfläche (rechts) in Funktion des Speicher/PCM-Radiusverhältnisses.	26
Abbildung 17: In blau ist der Temperaturverlauf dargestellt, wie er sich in der Realität verhält. Die rote Linie stellt den Temperaturverlauf bei der Berücksichtigung der drei Fälle dar. Die grüne Linie stellt den Temperaturverlauf bei der Berücksichtigung von sieben Fällen dar.....	32
Abbildung 18: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches durch die Schicht.....	35

Abbildung 19: Temperaturabweichung von den simulierten Werten mit unterschiedlicher Zeitauflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen einer 40 °C und einer 10 °C warmen Schicht, wenn nur der Temperatúraustausch durch Wärmeleitung zwischen den Schichten berücksichtigt wird (rechts).	37
Abbildung 20: Darstellung der Temperatúrausbreitung, wenn nur die Wärmeleitung durch die Schichten berücksichtigt wird. Zur Veranschaulichung von kleinen Temperaturänderungen stehen in den Balken jeweils die Temperaturen der einzelnen Schichten zur angegebenen Zeit.	37
Abbildung 21: Darstellung der Temperatúrausbreitung, wenn nur die freie Konvektion berücksichtigt wird. In den Balken stehen jeweils die Temperaturen der einzelnen Schichten zur angegebenen Zeit.	38
Abbildung 22: Darstellung der Temperatúrausbreitung, wenn die freie Konvektion und die Wärmeleitung berücksichtigt werden. In den Balken stehen jeweils die Temperaturen der einzelnen Schichten zur angegebenen Zeit.	38
Abbildung 23: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches zwischen PCM und HTF.	39
Abbildung 24: Temperaturabweichung von simulierten Werten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen 40 °C warmem PCM und 10 °C kaltem HTF, wenn nur der Temperatúraustausch zwischen PCM und HTF berücksichtigt wird (rechts).	40
Abbildung 25: Temperaturverlauf von 5 °C warmem PCM in 60 °C warmem HTF, bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei einer Unterscheidung von drei Fällen.	41
Abbildung 26: Temperaturverlauf von 5 °C warmem PCM in 60 °C warmem HTF, bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei einer Unterscheidung von sieben Fällen.	41
Abbildung 27: Vergleich zeitliche Auflösung zwischen 1 s und 60 s bei sieben Fällen.	42
Abbildung 28: Temperaturverlauf von 60 °C warmem PCM in 5 °C warmem HTF, bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei einer Unterscheidung von sieben Fällen.	43
Abbildung 29: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches durch die Wand.	43
Abbildung 30: Temperaturabweichung von simulierten Werten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperaturänderung im Speicher, wenn nur der Temperatúraustausch über die Mantelfläche des Speichers mit der Umgebungstemperatur berücksichtigt wird (rechts).	44
Abbildung 31: Simulation zur Plausibilisierung des Wärmeaustausches durch den Massenstrom.	45

Abbildung 32: Temperaturabweichung von simulierten Werten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur analytischen Funktion (links). Verlauf der Temperatur im Speicher, wenn dem 10 °C kalten Speicher 40 °C warmes HTF mit einem Massenstrom von 0.05 kg/s zugeführt wird (rechts).	46
Abbildung 33: Strömungsverlauf, PVT-Kreislauf fließt von S9 bis S7, WP-Kreislauf von Schicht S1 bis S3.	46
Abbildung 34: Verlauf der Schichttemperaturen, wenn nur die Temperaturänderung aufgrund der Strömung berücksichtigt wird. Es fließt 40 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.05 kg/s von S9 nach S7. Dazu fließt 0 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.02 kg/s von S1 nach S3.	47
Abbildung 35: Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten bei getrennten Strömen.	47
Abbildung 36: Strömungsverlauf, PVT-Kreislauf fließt von S9 zu S4, WP-Kreislauf von Schicht S1 bis S6.	47
Abbildung 37: Verlauf der Schichttemperaturen, wenn nur die Temperaturänderung aufgrund der Strömung berücksichtigt wird. Es fließt 40 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.05 kg/s von S9 nach S4. Dazu fließt 0 °C warmes HTF bei einem Massenstrom von 0.02 kg/s von S1 nach S6.	48
Abbildung 38: Temperaturen der einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten bei teilweise vermischten Strömen.	48
Abbildung 39: Schema der Standardsimulation	49
Abbildung 40: Temperaturverläufe der einzelnen Schichten von HTF und PCM. Die vertikal gestrichelten Linien in rot stellen den Phasenübergang von S5 dar. Die vertikal gestrichelten Linien in blau stellen den Wechsel vom Phasenübergang zum flüssigen Zustand dar.	52
Abbildung 41: Temperaturen der einzelnen Schichten zu den angegebenen Zeiten.	53
Abbildung 42: Wärmeeinflüsse der einzelnen Wärmeänderungsanteile während dem Erwärmen.	53
Abbildung 43: Wärmeeinflüsse der einzelnen Wärmeanteile während dem Kühlen.	54
Abbildung 44: Temperaturanstieg in S9, von HTF und PCM sowie in einem sensiblen Speicher, bei Standardbedingungen.	55
Abbildung 45: Wärmeentnahme aus einem PCM-Speicher und einem sensiblen Speicher. Der Temperaturverlauf vom PCM ist in grün dargestellt, dabei entsprechen die Zahlenwerte der Wärme den Temperaturen in °C.	56

Abbildung 46: Leistungsverlauf beim Entladen eines PCM-Speichers und einem sensiblen Speichers. Der Temperaturverlauf vom PCM ist in grün dargestellt, dabei entsprechen die Zahlenwerte der Wärme den Temperaturen in °C.	56
Abbildung 47: «Wärmeentnahme Absolut» stellt die absoluten Werte der Leistung und der Wärme bei PCM-Radien von 0.01 m und 0.05 m dar. «Wärmeentnahme Relativ» stellt die relativen Werte der Leistung und der Wärme bezogen auf den PCM-Radius 0.05 m dar. Im Vergleich wird ersichtlich, wo sich die Maximalwerte bilden. Zur Berechnung der Mittelwerte (mean) wurden die Werte aus dem rot markierten Feld verwendet.	59
Abbildung 48: «Wärmeentnahme Absolut» stellt die absoluten Werte der Wärme bei Schmelzwärmen von 100 kJ/kg und 400 kJ/kg dar. «Wärmeentnahme Relativ» stellt die relativen Werte der Wärme bezogen auf eine Schmelzwärme von 100 kJ/kg dar. Im Vergleich wird ersichtlich, wo sich der Maximalwert (gelber Punkt) und der Minimalwert (blauer Punkt) bilden. ...	60
Abbildung 49: Dauer der Wärmeentnahme von vorgegebenen Wärmemengen. In diesem Fall wird die Dauer bis die Wärmemenge bei einem PCM-Radius von 0.05 m erreicht wird durch die Dauer bei einem PCM-Radius von 0.01 m geteilt. Zur Veranschaulichung wird die Dauer bis die jeweilige Wärmemenge bei dem zu untersuchenden PCM-Radius erreicht wird als Linie dargestellt.	61
Abbildung 50: Wärmeübergangszahl, bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten [m/s] (links) und bei unterschiedlichen Radien [m] (rechts) abhängig von den Wärmeleitfähigkeiten $[W/(m^2 \cdot K)]$	62
Abbildung 51: Wärmeübergangszahl bei unterschiedlicher Füllichte [-] abhängig von der Wärmeleitfähigkeit $[W/(m^2 \cdot K)]$ (links). Wärmeübergangszahl relativ zu der Füllichte von 0.5 [-] (rechts).	62
Abbildung 52: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten $[W/(m \cdot K)]$. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Wärmeleitfähigkeit von 0.1 $W/(m \cdot K)$ dargestellt.	63
Abbildung 53: Kumulierte Wärme bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten $[W/(m \cdot K)]$. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einer Wärmeleitfähigkeit von 0.1 $W/(m \cdot K)$ dargestellt.	63
Abbildung 54: Leistungsverlauf bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten $[W/(m \cdot K)]$. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Wärmeleitfähigkeit von 0.1 $W/(m \cdot K)$ dargestellt.	63
Abbildung 55: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Radien [m]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einem Radius von 0.05 m dargestellt.	64
Abbildung 56: Wärmeverlauf vom HTF bei unterschiedlichen Radien [m]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Radius von 0.05 m dargestellt.	64

Abbildung 57: Leistungsverlauf vom HTF bei unterschiedlichen Radien [m]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Radius von 0.05 m dargestellt.	64
Abbildung 58: Temperaturverlauf von HTF im sensiblen Speicher und im PCM-Speicher bei unterschiedlichen Massenströmen [kg/s].	65
Abbildung 59: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Massenströmen [kg/s]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Massenstrom von 0.03 kg/s dargestellt.	65
Abbildung 60: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Massenströmen [kg/s]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Massenstrom von 0.03 kg/s dargestellt.	66
Abbildung 61: Die maximalen und mittleren Werte aus dem «Wärmeverlauf Relativ» und dem «Leistungsverlauf Relativ».	66
Abbildung 62: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Es werden die absoluten und relativen Werte der Parameter aus dem Kapitel Wärmeübergang dargestellt.	67
Abbildung 63: Die speicherbare Wärmemenge bei 20 °C (y-Achse links) und relativ zum sensiblen Speicher (y-Achse rechts) bei unterschiedlicher Füllichte und unterschiedlicher Wärmekapazität des PCMs.	68
Abbildung 64: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Dichten [kg/m ³]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Dichte von 1500 kg/m ³ dargestellt.	69
Abbildung 65: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Dichten [kg/m ³]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.	69
Abbildung 66: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Dichten [kg/m ³]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Dichte von 1500 kg/m ³ dargestellt.	69
Abbildung 67: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlicher Schmelzwärme [kJ/kg]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Schmelzwärme von 400 kJ/kg dargestellt.	70
Abbildung 68: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlicher Schmelzwärme [kJ/kg]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.	70
Abbildung 69: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlicher Wärmekapazität [kJ/kg]. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Schmelzwärme von 400 kJ/kg dargestellt.	70
Abbildung 70: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Füllichten [-]. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Füllichte von 0.5 dargestellt.	71
Abbildung 71: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Füllichten [-]. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.	71

Abbildung 72: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Fülldichten [-].Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Fülldichte von 0.5 dargestellt.	71
Abbildung 73: Temperaturverlauf von HTF bei einer Wärmekapazität im Speicher von ca. 25 MJ bei unterschiedlicher Fülldichte und Schmelzwärme. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einer Fülldichte von 0.5 dargestellt.	72
Abbildung 74: Wärmeverlauf von HTF bei einer Wärmekapazität im Speicher von ca. 25 MJ bei unterschiedlicher Fülldichte und Schmelzwärme. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zum sensiblen Speicher dargestellt.....	72
Abbildung 75: Leistungsverlauf von HTF bei einer Wärmekapazität im Speicher von ca. 25 MJ bei unterschiedlicher Fülldichte und Schmelzwärme. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einer Fülldichte von 0.5 dargestellt.	73
Abbildung 76: : Die maximalen und minimalen Wärmeverhältnisse aus dem «Wärmeverlauf Relativ».	73
Abbildung 77: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Es werden die absoluten Werte der Parameter aus dem Kapitel Wärmekapazität dargestellt.	74
Abbildung 78: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 2 °C dargestellt.....	75
Abbildung 79: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 2 °C dargestellt.	75
Abbildung 80: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 2 °C dargestellt.	76
Abbildung 81: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Absolut (links) und relativ zu einer Schmelztemperatur von 12 °C (rechts)...	76
Abbildung 82: Temperaturverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelzspannen. Rechts wird der Temperaturverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C dargestellt.	77
Abbildung 83: Wärmeverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelzspannen. Rechts wird der Wärmeverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C dargestellt.	77
Abbildung 84: Leistungsverlauf von HTF bei unterschiedlichen Schmelzspannen. Rechts wird der Leistungsverlauf relativ zu einem Schmelzbereich von 0 bis 20 °C dargestellt.	77
Abbildung 85: Veranschaulichung nach welcher Zeit [h] die angegebenen Wärmemengen [MJ] entnommen werden. Absolut (links) und relativ zu einer Schmelzspanne von 2 °C (rechts).	78

Abbildung 86: Temperatur- und Wärmeverlauf bei unterschiedlichen Ladetemperaturen von PCM- und sensiblem Speicher. Die schwarzen Punkte in «Wärmeverlauf HTF» kennzeichnen die Schnittstelle, bei welcher der Wärmeverlauf vom PCM-Speicher den Wärmeverlauf vom sensiblen Speicher schneidet.....	79
Abbildung 87: Verhältnis zwischen entziehbarer Wärme vom PCM-Speicher zum sensiblen Speicher bei unterschiedlichen Ladetemperaturen [°C].	79
Abbildung 88: COP-Werte bei unterschiedlichen Temperaturen einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe von (CTA, 2014). Weil die Daten der Kurven nicht vorhanden sind, wird die Kurve $T_v=35\text{ °C}$ durch zwei Geraden (blau gestrichelte Linien) zwischen den Punkten ($T=0\text{ °C} COP=4.3$), ($T=10\text{ °C} COP=5.9$), ($T=20\text{ °C} COP=7.9$) nachgebildet. Durch diese Geraden werden die COP-Werte bei den unterschiedlichen Temperaturen interpoliert.	80
Abbildung 89: Mittlere COP-Werte vom Standard PCM-Speicher und dem sensiblen Speicher (links) und ein PCM-Speicher mit unterschiedlichen Füllmengen bei einer Wärmekapazität von 25 MJ (rechts)	81
Abbildung 90: Mittlere COP-Werte bei den untersuchten Parametern beim Wärmeübergang.	81
Abbildung 91: Mittlere COP-Werte bei den untersuchten Parametern der Wärmekapazität.....	81
Abbildung 92: Mittlere COP-Werte bei unterschiedlichen Ladetemperaturen.....	82
Abbildung 93: Mittlere COP-Werte bei unterschiedlichen Schmelzbereichen.	82
Abbildung 94: Leistungskurven Wärmepumpe Optiheat (CTA, 2014).....	99
Abbildung 95: PCM-Products LTD (PCM Products Ltd, 2018).....	100

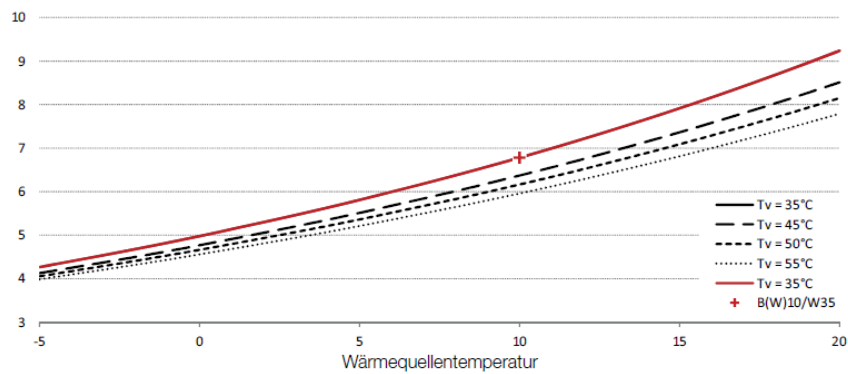
Anhang 1

Leistungskurven Optiheat OH 1-5es

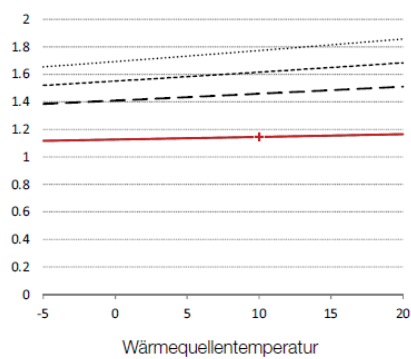
Volumenstrom Quelle minimal / nominal / Norm 1.18/1.35/1.58 m³/h
Volumenstrom Heizung minimal / nominal / Norm 0.57/0.82/1.15 m³/h

Leistungsangaben nach EN 14511

Heizleistung in kW



Elektrische Leistung in kW



Leistungszahl COP

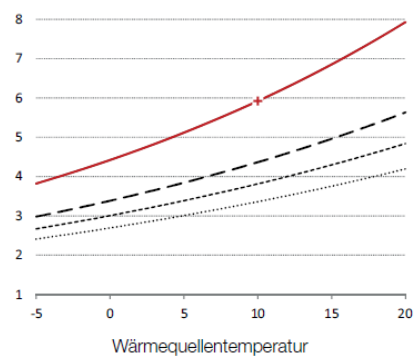


Abbildung 94: Leistungskurven Wärmepumpe Optiheat (CTA, 2014)

Anhang 2

PlusICE Hydrated Salt (S) Range



PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity		Maximum Operating Temperature	
	(°C)	(°F)	(kg/m³)	(lb/ft³)	(kJ/kg)	(Btu/lb)	(MJ/m³)	(Btu/ft³)	(kJ/kgK)	(Btu/lb°F)	(W/mK)	(Btu/Hr ft² °F)	(°C)	(°F)
S8	8	46	1,475	92	130	56	192	5,147	1.90	0.45	0.44	0.25	60	140
S10	10	50	1,470	92	170	73	250	6,707	1.90	0.45	0.43	0.25	60	140
S13	13	55	1,515	95	150	65	227	6,099	1.90	0.45	0.43	0.25	60	140
S15	15	59	1,510	94	180	77	272	7,295	1.90	0.45	0.43	0.25	60	140
S17	17	63	1,525	95	155	67	236	6,344	1.90	0.45	0.43	0.25	60	140
S18	18	64	1,520	95	145	62	220	5,916	1.90	0.45	0.43	0.25	60	140
S19	19	66	1,520	95	175	75	266	7,139	1.90	0.45	0.43	0.25	60	140
S20	20	68	1,530	96	195	84	298	8,008	2.20	0.52	0.54	0.31	60	140

PlusICE Organic (A) Range



PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity		Maximum Operating Temperature	
	(°C)	(°F)	(kg/m³)	(lb/ft³)	(kJ/kg)	(Btu/lb)	(MJ/m³)	(Btu/ft³)	(kJ/kgK)	(Btu/lb°F)	(W/mK)	(Btu/Hr ft² °F)	(°C)	(°F)
A2	2	36	765	48	230	99	176	4,723	2.20	0.52	0.21	0.12	150	302
A3	3	37	765	48	230	99	176	4,723	2.20	0.52	0.21	0.12	150	302
A4	4	39	766	48	235	101	180	4,832	2.18	0.52	0.21	0.12	150	302
A5	5	41	768	48	170	73	131	3,504	2.18	0.52	0.22	0.10	150	302
A6	6	43	768	48	185	80	142	3,813	2.17	0.51	0.21	0.12	150	302
A6.5	6.5	44	770	48	190	82	146	3,927	2.18	0.52	0.22	0.10	150	302
A7	7	45	770	48	190	82	146	3,927	2.18	0.52	0.22	0.10	150	302
A8	8	46	770	48	180	77	139	3,720	2.16	0.51	0.21	0.12	150	302
A9	9	48	770	48	190	82	146	3,927	2.16	0.51	0.21	0.12	150	302
A10	10	50	770	48	210	90	162	4,340	2.16	0.51	0.22	0.10	150	302
A11	11	52	775	48	210	90	163	4,368	2.16	0.51	0.22	0.10	150	302
A12	12	54	775	48	215	93	167	4,472	2.16	0.51	0.22	0.10	150	302
A13	13	55	775	48	225	97	174	4,680	2.16	0.51	0.22	0.10	150	302
A14	14	57	775	48	200	86	155	4,160	2.16	0.51	0.22	0.10	150	302
A15	15	59	780	49	205	88	160	4,292	2.16	0.51	0.18	0.10	150	302
A16	16	61	780	49	225	97	176	4,710	2.16	0.51	0.18	0.10	150	302
A17	17	63	780	49	235	101	183	4,920	2.18	0.52	0.18	0.10	200	392
A18	18	64	765	48	155	67	119	3,183	2.18	0.52	0.22	0.10	200	392
A19	19	66	765	48	150	65	115	3,080	2.18	0.52	0.22	0.10	200	392
A20	20	68	770	48	160	69	123	3,307	2.20	0.52	0.22	0.10	200	392

Abbildung 95: PCM-Products LTD (PCM Products Ltd, 2018)

Tabelle 2 Bio PCM («Phase Change Material Data Sheets I PCM Product Details», o. J.)

PCM Typ	Schmelztemperatur [°C]	Dichte [g/cm ³]	Schmelzwärme [kJ/kg]	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
Q12	12	0.85-1.4	210-250	2.2-4.5	0.15-2.5
Q15	15	0.85-1.4	210-250	2.2-4.5	0.15-2.5
Q18	18	0.85-1.4	210-250	2.2-4.5	0.15-2.5
Q20	20	0.85-1.4	210-250	2.2-4.5	0.15-2.5

Tabelle 3 savE PCM («PLUS – PCM Range», o. J.)

PCM Typ	Schmelztemperatur [°C]	Dichte [kg/m ³]	Schmelzwärme [kJ/kg]	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
savE OM18	19	830-890	212	2.69-2.92	0.175-0.182
savE FS18	20	868-949	123	2.55-3.14	0.213-0.315

Tabelle 4 Rubitherm PCM («PLUS – PCM Range», o. J.)

PCM Typ	Schmelztemperatur [°C]	Dichte [kg/m ³]	Schmelzwärme [kJ/kg]	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
RT11 HC	10-12	770-880	200 +/- 7.5%	2	0.2
RT12	7-13	770-880	155 +/- 7.5 %	2	0.2
RT15	10-17	770-880	155 +/- 7.5 %	2	0.2
RT18 HC	17-19	770-880	260 +/- 7.5 %	2	0.2
SP15	15-17	1.4-1.45	180 +/- 7.5 %	2	0.6

Entwicklung eines numerischen Modells eines PCM-Speichers für die Anwendung in Wärmepumpensystemen

Einleitung

Zur Energiewende werden Energiespeicher benötigt, um erneuerbare Energien nach Bedarf zu nutzen. Wenn Wärmespeicher als Wärmequelle für Wärmepumpen eingesetzt werden, kann durch die Nutzung der gespeicherten Wärme und durch die höhere Leistungszahl der Stromverbrauch gesenkt werden. Damit die Wärmepumpe mit einer hohen Leistungszahl betrieben werden kann, muss im Speicher viel Wärme zwischen 0 und 20 °C gespeichert werden können. Dafür eignen sich Speicher mit Phasenwechselmaterialien (PCM-Speicher), weil sie aufgrund des Phasenwechsels viel Wärme bei kleinen Temperaturspannen speichern können.

Methoden

In dieser Arbeit wurde ein Simulationsmodell von einem PCM-Speicher mit kugelförmig verkapseltem Phasenwechselmaterial (PCM; engl. *phase change material*) modelliert. Beim untersuchten PCM-Speicher erfolgte der Wärmeübergang zwischen PCM und Wärmetransportfluid (HTF; engl. *heat transport fluid*) durch die Umströmung der PCM-Kugeln. Anhand dieses Modells konnten die Auswirkungen von Parameteränderungen auf das Speicherverhalten sowie die Unterschiede zu einem sensiblen Speicher analysiert werden. Ziel dieser Arbeit ist das Verhalten eines PCM-Speichers aufgrund eines Simulationsmodells zu verstehen.

Resultate

Speicherverhalten

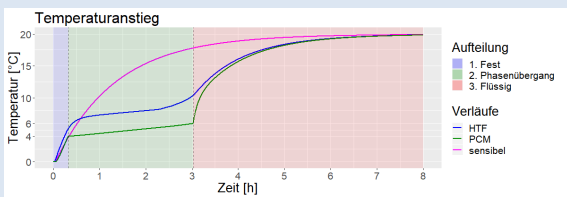


Abbildung 1: Temperaturanstieg in der obersten Speicherschicht, von HTF und PCM sowie in einem sensiblen Speicher, wenn der 240 l Speicher mit einem Massenstrom von 100 l/h bei einer Temperatur von 20 °C geladen wird.

Abbildung 1 zeigt, dass die Temperaturzunahme im Phasenübergang (4 bis 6 °C) sehr gering ist. In einem sensiblen Speicher approximiert die Speichertemperatur zur Ladetemperatur.

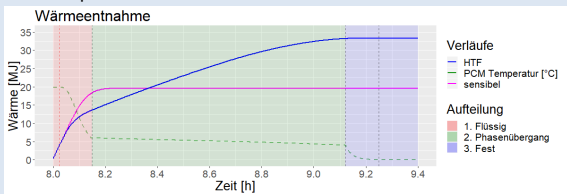


Abbildung 2: Wärmeentnahme aus einem PCM-Speicher und einem sensiblen Speicher nach dem Ladevorgang aus Abbildung 1. Der Temperaturverlauf vom PCM ist in grün dargestellt, dabei entsprechen die Zahlenwerte der Wärme den Temperaturen in °C.

Abbildung 2 zeigt, dass bei gleichem Ladeverhalten aus einem PCM-Speicher mehr Wärme entnommen werden kann als aus einem sensiblen Speicher.

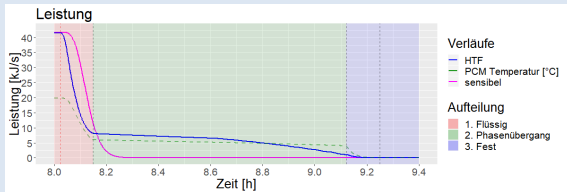


Abbildung 3: Leistungsverlauf bei der Wärmeentnahme aus einem PCM-Speicher und einem sensiblen Speicher. Der Temperaturverlauf vom PCM ist in grün dargestellt, dabei entsprechen die Zahlenwerte der Wärme den Temperaturen in °C.

Abbildung 3 zeigt, dass während das bereits warme HTF aus dem Speicher ausfliesst die Wärme aus dem PCM-Speicher bei gleicher Leistung entnommen werden kann wie aus dem sensiblen Speicher. Die Dauer der hohen Leistungsentnahme kann über die Füllichte bestimmt werden.

Einfluss Wärmeübergang

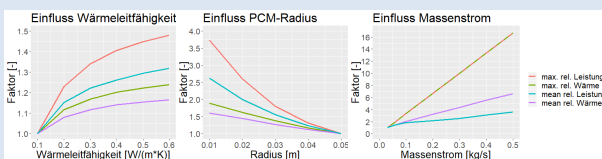


Abbildung 4: Darstellung von maximale und mittlere relative Leistung und relative Wärme bei unterschiedlichen Parametern. Die Parameter sind jeweils relativ zum leistungsschwächsten Parameter dargestellt. Diese Werte besagen wieviel mehr Leistung oder Wärme zu einem Zeitpunkt während dem entladen Maximal oder durchschnittlich entnommen werden können.

Ein hoher Wärmeübergang zwischen PCM und HTF führt zu einem schnelleren Lade- und entlade verhalten. Abbildung 4 zeigt, dass der Wärmeübergang durch Erhöhen der Wärmeleitfähigkeit des PCMs, des Massenstromes und der Füllichte und dem Verkleinern der PCM-Radien gesteigert wird.

Resultate

Einfluss Wärmekapazität

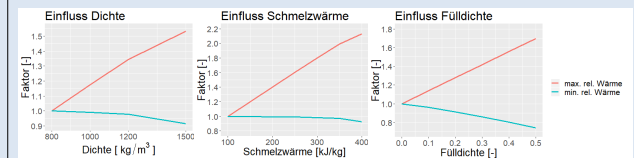


Abbildung 5: Die Kurven beziehen sich auf das Verhältnis zwischen dem untersuchten Parameter mit dem Parameter bei der geringsten Wärmekapazität. Aus max. rel. Wärme ergibt sich wieviel mehr Wärme durch die Erhöhung des Parameters im Speicher bei gleichem Ladeverhalten gespeichert werden kann. Bei hohen Wärmekapazitäten kann der Speicher nicht komplett beladen werden, wodurch aufgrund der tieferen Temperaturen kurzfristig weniger Wärme bezogen werden kann. Min. rel. Wärme bezieht sich auf dieses minimale Verhältnis.

Ein Speicher mit hoher Wärmekapazität nimmt wegen des langsamen Temperaturanstieges beim Laden mehr Wärme auf als ein Speicher mit kleiner Wärmekapazität, weil über längere Zeit ein grösserer Temperaturunterschied zur Ladetemperatur vorliegt. Durch die tieferen Temperaturen im Speicher sinkt die kurzzeitig beziehbare Leistung. Abbildung 5 zeigt, dass die Wärmekapazität vom PCM durch Erhöhen der PCM-Dichte, der Schmelzwärme und der Füllichte gesteigert wird.

Einfluss Ladetemperaturen

Das Verhältnis der speicherbaren Wärme zwischen einem PCM-Speicher und einem sensiblen Speicher ist von den Ladetemperaturen abhängig. Bei zu geringer Ladetemperatur, kann der PCM-Speicher nicht komplett geladen werden, bei zu hoher Ladetemperatur steigt die Wärmekapazität im sensiblen Speicher aufgrund der höheren Wärmekapazität (siehe Abbildung 6).

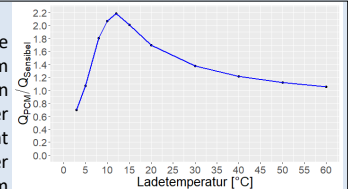


Abbildung 6: Verhältnis zwischen der gespeicherten Wärme von einem PCM-Speicher zu einem sensiblen Speicher bei unterschiedlichen Ladetemperaturen. Dabei entspricht der Schmelzbereich vom PCM 4 bis 6 °C.

Vergleich in Wärmepumpensystem

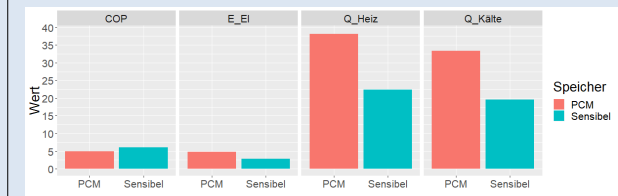


Abbildung 7: Vergleich des PCM-Speichers und des sensiblen Speichers im Wärmepumpensystem. Q_Kälte entspricht der im Speicher gespeicherten Wärme. Der COP wurde aufgrund der ausfliessenden HTF-Temperaturen bestimmt. Über Q_Kälte und den COP wurden die produzierte Wärme Q_Heiz und die dafür benötigte elektrische Energie E_EI berechnet.

Ein Wärmepumpensystem produziert mit einem PCM-Speicher, aufgrund der höheren Wärmekapazität mehr Wärme als mit einem sensiblen Speicher als Wärmequelle. Mit einem sensiblen Speicher als Wärmequelle kann die Wärmepumpe, aufgrund der höheren Austrittstemperaturen, effizienter betrieben werden als mit einem PCM-Speicher.

Diskussion

Wenn das Simulationsmodell optimiert und validiert wird, können Simulationen in verschiedenen Wärmesystemen über das ganze Jahr durchgeführt werden. Dann kann aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen sich PCM-Speicher am besten eignen.

Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Masterarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Masterarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Masterarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinar massnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Wädenswil, 14.02.2019

Unterschrift:

M. Krüster

Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Masterarbeiten im Anhang mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.